

**FELIPE RICHTER REIS**

**SECAGEM A VÁCUO DE YACON: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE  
PROCESSO SOBRE PARÂMETROS DE QUALIDADE E CINÉTICA DE SECAGEM**

**Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Engenharia de Alimentos da Universidade Federal  
do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau  
de Doutor em Engenharia de Alimentos.**

**Orietadora: Profa Dra Maria Lucia Masson**

**Co-orientador: Prof Dr Marcelo Kaminski Lenzi**

**CURITIBA**

**2011**

R375s      Secagem a vácuo de Yacon: influência das condições de processo  
sobre parâmetros de qualidade e cinética da secagem. / Felipe Richter  
Reis – – Curitiba, PR, 2011.  
62f.; il.; 30 cm.

Tese de Doutorado (Engenharia de Alimentos) – Universidade  
Federal do Paraná, 2011.

Orientadora: Profª Dra. Maria Lucia Masson

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Kaminski Lenzi

Bibliografia

1. Alimentos – Engenharia. 2. Yacon (*Smallanthus sonchifolius*). 3.  
Qualidade. 4. Secagem.

CDD 664.22

**FELIPE RICHTER REIS**

**SECAGEM A VÁCUO DE YACON: INFLUÊNCIA DAS  
CONDIÇÕES DE PROCESSO SOBRE PARÂMETROS DE  
QUALIDADE E CINÉTICA DE SECAGEM**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de  
Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Alimentos, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão  
formada pelos professores:



Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARIA LÚCIA MASSON  
Setor de Tecnologia, UFPR



Prof. Dr. JOSÉ VLADIMIR DE OLIVEIRA  
Departamento de Engenharia Química e Engenharia  
de Alimentos, UFSC



Prof. Dr. FABRÍCIO MACHADO SILVA  
Instituto de Química, UNB



Prof. Dr. CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK  
Coordenação de Alimentos, UTFPR-Campo Mourão



Prof. Dr. MARCOS ROGÉRIO MAFRA  
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, 18 de novembro de 2011.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE EQUAÇÕES</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiii
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Objetivo Geral.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.1 A MATÉRIA-PRIMA.....	3
2.2 SECAGEM.....	7
2.2.1 Secagem a Vácuo.....	10
2.3 TEORIA FRACTAL.....	14
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	19
3.1 MATERIAIS.....	19
3.2 MÉTODOS.....	19
3.2.1 Preparo da Matéria-prima.....	19
3.2.2 Pré-tratamento de Inibição do Escurecimento Enzimático.....	19
3.2.3 Secagem.....	19
3.2.4 Medidas de Textura.....	20
3.2.5 Medidas de Cor.....	20
3.2.6 Medidas de Umidade e Atividade de Água.....	21
3.2.7 Delineamento Experimental.....	21
3.2.8 Análise de Imagem e Cálculo da Dimensão Fractal.....	23
3.2.9 Cálculo da Razão de Reidratação.....	23
3.2.10 Modelagem da Cinética de Secagem.....	24
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	25
4.1 VARIAÇÃO DA COR AO LONGO DA SECAGEM.....	25

4.1.1 Variação da Luminosidade das Fatias de Yacon ao longo da Secagem....	25
4.1.2 Variação da Tonalidade Verde-vermelha ( $a^*$ ) das Fatias de Yacon ao longo da Secagem.....	26
4.1.3 Variação da Tonalidade Azul-amarela ( $b^*$ ) das Fatias de Yacon ao longo da Secagem.....	28
4.2 VARIAÇÃO DA TEXTURA AO LONGO DA SECAGEM.....	29
4.3 CINÉTICA DE SECAGEM.....	31
4.4 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE AS RESPOSTAS...	36
4.5 DIMENSÃO FRACTAL E RAZÃO DE REIDRATAÇÃO.....	46
4.6 CORRELAÇÃO ENTRE DIMENSÃO FRACTAL E OUTRAS PROPRIEDADES.....	49
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>51</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo apoio em todas as horas, e à minha noiva, Daiany B. Gatti, que é o início de uma nova família para mim, por todo o seu amor.

A todos os colegas da Pós-graduação, em especial Bogdan e Diego, que se mostraram grandes amigos e companheiros durante minha trajetória no PPGEAL.

Aos Professores Doutores Maria Lucia Masson e Marcelo Kaminski Lenzi, que mostraram que afinidade e trabalho duro podem originar ótimos resultados.

Aos professores participantes das bancas de qualificação e defesa, que com sua dedicação possibilitaram a geração de um trabalho genuinamente científico.

A todos os demais membros da Pós-graduação, pela amizade do dia-a-dia.

À CAPES, pela bolsa de estudo e ao CNPq, por ter propiciado a execução deste trabalho sob a forma de excelentes equipamentos.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FATORES UTILIZADOS E SEUS RESPECTIVOS NÍVEIS CODIFICADOS E NÃO CODIFICADOS.....	22
TABELA 2 - DELINEAMENTO FATORIAL COMPLETO PROPOSTO.....	22
TABELA 3 - VALORES DE LUMINOSIDADE ( $L^*$ ) FINAL DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS A VÁCUO.....	26
TABELA 4 - DUREZA FINAL DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS A VÁCUO.....	31
TABELA 5 - PARÂMETROS DOS MODELOS UTILIZADOS PARA AJUSTAR A CINÉTICA DE SECAGEM DO YACON.....	32
TABELA 6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A LUMINOSIDADE FINAL DO PRODUTO.....	36
TABELA 7 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A TONALIDADE AZUL-AMARELA MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.....	39
TABELA 8 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A SATURAÇÃO MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.....	41
TABELA 9 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A DIMENSÃO FRACTAL DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.....	44
TABELA 10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A RAZÃO DE REIDRATAÇÃO DO PRODUTO.....	45
TABELA 11 - DIMENSÃO FRACTAL DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS.	47
TABELA 12 - RAZÃO DE REIDRATAÇÃO DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS.....	49

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - VARIAÇÃO DA LUMINOSIDADE ( $L^*$ ) DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.....	25
GRÁFICO 2 - VARIAÇÃO DA TONALIDADE VERDE-VERMELHA ( $a^*$ ) DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.....	27
GRÁFICO 3 - VARIAÇÃO DA TONALIDADE AZUL-AMARELA ( $b^*$ ) DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.....	28
GRÁFICO 4 - VARIAÇÃO DA DUREZA DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.....	30
GRÁFICO 5 – CINÉTICA DE SECAGEM AJUSTADA PELO MODELO DE PAGE MODIFICADO PARA O YACON DESIDRATADO NOS EXPERIMENTOS DE 1 A 11..	33
GRÁFICO 6 - VALORES OBSERVADOS VS VALORES PREDITOS PELO MODELO DE PAGE MODIFICADO PARA A CINÉTICA DE SECAGEM DO EXPERIMENTO 1 A 11.....	34
GRÁFICO 7 – VARIAÇÃO DA RAZÃO ENTRE UMIDADES COM O TEMPO PARA OS ONZE EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	35
GRÁFICO 8 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS FATIAS E DA TEMPERATURA DE SECAGEM SOBRE A LUMINOSIDADE DO PRODUTO FINAL.....	37
GRÁFICO 9 – EFEITO DOS FATORES SOBRE A LUMINOSIDADE FINAL DAS AMOSTRAS.....	38
GRÁFICO 10 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO E DA TEMPERATURA DE SECAGEM SOBRE A TONALIDADE AZUL-AMARELA MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.....	40
GRÁFICO 11 – EFEITO DOS FATORES SOBRE A TONALIDADE AZUL-AMARELA MÉDIA DAS AMOSTRAS.....	40
GRÁFICO 12 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO E DA TEMPERATURA DE SECAGEM SOBRE A SATURAÇÃO MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.....	42
GRÁFICO 13 – EFEITO DOS FATORES SOBRE A SATURAÇÃO MÉDIA DAS AMOSTRAS.....	43



GRÁFICO 14 - EFEITO DOS FATORES SOBRE A DIMENSÃO FRACTAL DAS AMOSTRAS.....	44
GRÁFICO 15 - EFEITO DOS FATORES SOBRE A RAZÃO DE REIDRATAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	46
GRÁFICO 16 – RELAÇÃO ENTRE DIMENSÃO FRACTAL E RAZÃO DE REIDRATAÇÃO.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	- Constante do modelo de Henderson-Pabis
a*	- Tonalidade verde-vermelha
a <sub>0</sub> *	- Tonalidade verde-vermelha inicial
b*	- Tonalidade azul-amarela
b <sub>0</sub> *	- Tonalidade azul-amarela inicial
b.u.	- Base úmida
C*	- Saturação
CIE	- <i>Comission Internationale de l'Eclairage</i>
DF	- Dimensão fractal
DPPH	- 1,1-difenil-2-picrilhidrazil
espess.	- Espessura
EUA	- Estados Unidos da América
Exper.	- Experimento
FAO	- <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FOS	- Frutooligossacarídeos
h*	- Ângulo de tom
Inter.	- Interação
k	- Parâmetro dos modelos de secagem
L*	- Luminosidade
L <sub>0</sub> *	- Luminosidade inicial
m/m	- Massa por massa
M	- Massa da amostra reidratada
M <sub>0</sub>	- Massa da amostra desidratada
MR	- Razão entre umidades
n	- Parâmetro dos modelos de secagem
NIST	- <i>National Institute of Standards and Technology</i>
Nr	- Número de caixas do método <i>Box Counting</i>
pH	- Potencial hidrogeniônico
r	- Tamanho de cada caixa no método <i>Box Counting</i> ou coeficiente de correlação
R <sup>2</sup>	- Coeficiente de determinação

RR	- Razão de reidratação
SEMATECH	- <i>Semiconductor Manufacturing Technology</i>
t	- Tempo
temper.	- Temperatura
$X_{wt}$	- Umidade do produto no tempo t
$X_{we}$	- Umidade de equilíbrio
$X_{wo}$	- Umidade inicial do produto

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – RAZÃO ENTRE UMIDADES.....	8
EQUAÇÃO 2 – MODELO DE NEWTON.....	9
EQUAÇÃO 3 – MODELO DE HENDERSON-PABIS.....	9
EQUAÇÃO 4 – MODELO DE PAGE.....	9
EQUAÇÃO 5 – MODELO DE PAGE MODIFICADO.....	9
EQUAÇÃO 6 – DESVIO PADRÃO DA MÉDIA.....	23
EQUAÇÃO 7 –DIMENSÃO FRACTAL.....	23
EQUAÇÃO 8 – RAZÃO DE REIDRATAÇÃO.....	24

## Resumo

O objetivo do presente trabalho foi estudar a cinética da secagem a vácuo de fatias de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) e avaliar o efeito de diferentes condições de processo sobre parâmetros de qualidade do produto. O yacon é um tubérculo considerado alimento funcional devido ao seu alto teor de fibras pré-bióticas e compostos fenólicos. Para ajustar os dados de cinética da secagem a vácuo do yacon, foram utilizados os modelos de Newton, Henderson-Pabis, Page e Page modificado. A influência da temperatura de secagem, concentração de ácido cítrico no pré-tratamento de inibição enzimática e espessura das fatias sobre a cor, a textura, umidade, a atividade de água, a razão de reidratação e a dimensão fractal foi avaliada por meio de um delineamento fatorial  $2^3$  e três repetições no ponto central. As variações de cor e textura ao longo da secagem a vácuo também foram avaliadas. A estimativa de erro experimental foi realizada com base nas medidas de atividade de água do yacon processado nos experimentos conduzidos no ponto central. Os resultados mostraram que o modelo de Page modificado explicou a variação da umidade do yacon ao longo da secagem a vácuo com o mais alto valor de coeficiente de determinação e o mais baixo valor de erro médio de predição. Com o avanço da secagem, a cor do yacon tornou-se mais escura (diminuição do valor de luminosidade ou  $L^*$ ), mais vermelha (aumento da tonalidade verde-vermelha ou  $a^*$ ) e mais amarela (aumento da tonalidade azul-amarela ou  $b^*$ ). A textura do yacon variou pouco nos instantes iniciais de secagem, seguida de amaciamento (diminuição da dureza) em instantes intermediários e endurecimento (aumento da dureza) nos instantes finais. Observou-se que altas temperaturas (58 - 65 °C), baixas espessuras ( $\leq 0,4$  cm) e altas concentrações de ácido (0,8 - 1,0 g/100 g) deram origem a produtos de cor pouco escurecida (altos valores de  $L^*$ ), amarela dourada (altos valores de  $b^*$ ) e bastante apelativa (altos valores de  $C^*$ ). A dimensão fractal diminuiu com o aumento da temperatura de secagem. A taxa de reidratação diminuiu com o aumento da espessura das fatias. Obteve-se correlações significativas da dimensão fractal com a umidade final, tonalidade ( $h^*$ ) e razão de reidratação, sugerindo que estas análises podem ser complementadas por uma análise de imagem. Todos os ensaios deram origem a produtos com atividade de água inferior a 0,6, o que sugere que o produto final é estável ao armazenamento prolongado.

Palavras-chave: yacon, *Smallanthus sonchifolius*, secagem a vácuo, cor, textura, dimensão fractal.

## Abstract

The aim of this work was to study the vacuum drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices and evaluate the effect of variable process conditions on product quality parameters. Yacon is considered a functional tuber due to its high prebiotic fibers and phenolic compounds contents. In order to fit the vacuum drying kinetics of yacon, the Newton, the Henderson-Pabis, the Page and the Modified Page models were used. The influence of drying temperature, citric acid concentration in the enzymatic inhibition pretreatment e slices thickness on color, texture, water activity, rehydration ratio and fractal dimension was evaluated by using a  $2^3$  full factorial design with three replications in the center point. The changes in product color and texture during drying were also evaluated. The experimental error was evaluated on the basis of the water activity measurements of the yacon processed in the trials carried out in the center points. Results showed that the Modified Page model explained the changes in yacon moisture content during the vacuum drying with the highest value of coefficient of determination and the lowest value of mean prediction error. With the advance of the drying process, the yacon color became darker (decrease in lightness value or  $L^*$ ), redder (increase in greenness-redness or  $a^*$ ) and yellower (increase in blueness-yellowness or  $b^*$ ). The yacon texture changed little on initial drying stages, followed by softening (decrease in hardness) at intermediate drying times and hardening (increase in hardness) at the end of the drying process. It was observed that high temperatures (58 - 65 °C), low thicknesses ( $\leq 0.4$  cm) and high acid concentrations (0.8 – 1.0 g/100 g) yielded products with slightly darkened (high  $L^*$  values), golden yellow (high  $b^*$  values) and very appealing (high saturation or  $C^*$ ) color. The fractal dimension decrease with an increase in temperature. The rehydration ratio decrease with an increase in slices thickness. Significant correlations between fractal dimension and final moisture content, hue angle ( $h^*$ ) and rehydration ratio were obtained, suggesting that such analyses may be complemented by and image analysis. All assays yielded products presenting water activity below 0.6, suggesting that the final product is shelf-stable.

Keywords: yacon, *Smallanthus sonchifolius*, vacuum drying, color, texture, fractal dimension.

## 1 INTRODUÇÃO

O yacon (*Smallanthus sonchifolius*) é um tubérculo originário dos Andes, de aparência externa similar à batata-doce, mas de sabor mais doce e textura crocante. Consumido a centenas de anos nos países andinos, o yacon tem-se popularizado no Brasil nos últimos anos devido às suas propriedades nutricionais. Ao yacon são atribuídas propriedades promotoras da saúde ou funcionais, como o alto teor de fibras prebióticas e de compostos fenólicos. Contudo, o yacon é um alimento de curta vida de prateleira devido ao seu alto teor de água. (LACHMAN, FERNÁNDEZ e ORSÁK, 2003; SIMONOVSKA et al., 2003).

Devido às suas propriedades funcionais e agradáveis propriedades sensoriais, o yacon tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos. Tais estudos incluem o yacon minimamente processado (LIMA, 2003; MICHELS, 2005), o yacon desidratado (MOURA, 2004; SCHER, RIOS e NOREÑA, 2009; PADILHA et al., 2009; KOTOVICZ, 2011), além de outros alimentos onde se utilizou o yacon como ingrediente, como panifícios (MOSCATTO et al., 2006; ROSA et al., 2009) e bebidas (SILVA, 2004).

A secagem consiste em um processo de remoção de água de um produto e têm como resultado principal o aumento da sua vida de prateleira ou “shelf life”, devido à diminuição da sua atividade de água. Além disso, a secagem dá origem a produtos de menor volume e menor custo com transportes e embalagens e também influencia as características sensoriais dos alimentos, como sabor, cor e textura diferenciadas (MUJUMDAR, 2006). A secagem a vácuo consiste em conduzir a secagem em um ambiente com pressão inferior à atmosférica, onde se utilizam temperaturas inferiores àquelas que seriam necessárias sob pressão atmosférica para se obter o mesmo efeito. Segundo relatos anteriores, as fibras prébióticas do yacon são hidrolisadas a 70°C (SCHER, RIOS e NOREÑA, 2009) e a maioria dos seus compostos fenólicos é destruída a 80°C (TAKENAKA et al., 2006). Portanto, a secagem a vácuo é indicada para produtos termossensíveis, como é o caso do yacon. Estudos anteriores envolvendo a secagem a vácuo incluem alimentos como o aipo (MADAMBA e LIBOON, 2001), a manga (JAYA e DAS, 2003), a banana (THOMKAPANICH, SUVARNAKUTA e DEVAHASTIN, 2007) e o alho (RAHMAN et al., 2009).

Fractais são objetos geométricos que podem ser divididos em partes, sendo cada uma dessas partes semelhantes ao objeto original. Os fractais são caracterizados pela sua dimensão, que pode ser descrita por diferentes relações em função da sua estrutura, mas que de forma geral são números fracionários e não inteiros, ao contrário de figuras geométricas euclidianas (MANDELBROT, 1983). Nos últimos anos fractais estão sendo utilizados com

maior frequência para modelar fenômenos com maior confiabilidade (MALGAREZZI e LENZI, 2009). Na área de alimentos, encontram-se estudos utilizando a teoria fractal na modelagem da aparência de produtos desidratados (CHANONA et al., 2003; KERDPIBOON, DEVAHASTIN e KERR, 2007; CAMPOS-MENDIOLA et al., 2007), aparência interna de queijos (FAGAN et al., 2008), e paníficos (GONZALES-BARRON e BUTLER, 2008; PÉREZ-NIETO et al., 2010), aparência de bananas, peras e maçãs após sofrerem escurecimento enzimático (QUEVEDO et al., 2009a; QUEVEDO et al., 2009b; QUEVEDO et al., 2009c), e aparência de camarões cozidos (NIAMNUY, DEVAHASTIN e SOPONRONNARIT, 2008).

As informações acima descritas resumem o estado da arte envolvido no presente projeto. Após levantamento junto a bases de dados, observou-se que não existem estudos onde tais informações tenham sido combinadas em um único documento, demonstrando que há uma lacuna na literatura. Neste sentido, surgiu o interesse em realizar o presente estudo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a influência de diferentes condições de secagem a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de yacon.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar a influência da temperatura de secagem, espessura das fatias e concentração de ácido no pré-tratamento osmótico de inibição do escurecimento enzimático sobre a cor, a textura, a taxa de reidratação, atividade de água, a umidade e a dimensão fractal das fatias de yacon.
- Estudar a variação da cor do yacon durante o processo de secagem.
- Estudar a variação da textura do yacon durante o processo de secagem.
- Modelar a cinética de secagem das fatias de yacon.
- Avaliar a existência de correlação entre dimensão fractal e parâmetros de qualidade tradicionais.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A MATÉRIA-PRIMA

O yacon é uma planta pertencente à família Asteraceae, atualmente conhecido pelo nome científico *Smallanthus sonchifolius* (LACHMAN, FERNÁNDEZ e ORSÁK, 2003). No passado, a planta era conhecida como *Polymnia sonchifolia* (GRAEFE et al., 2004). Trata-se de uma planta perene que produz tubérculos comestíveis de textura crocante, sabor doce e grande suculência. A planta é nativa dos Andes, bastante resistente e capaz de desenvolver-se sob clima quente ou frio (LACHMAN, FERNÁNDEZ e ORSÁK, 2003).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO (2007), o yacon é uma planta compacta e herbácea, apresentando folhas verde-escuras em formato de diamante. Quando adulta, a planta atinge entre 1,5 a 2 m de altura. Os tubérculos apresentam formato irregular, pesam em geral entre 200 e 500 g - embora haja relatos de tubérculos com até 2 kg – e apresentam coloração púrpura em seu exterior e alaranjada no interior. Na Figura 1 são apresentados a planta e os tubérculos de yacon.

FIGURA 1: PLANTA (A), TUBÉRCULOS DE YACON COM (B) E SEM CASCA (C).



A



B



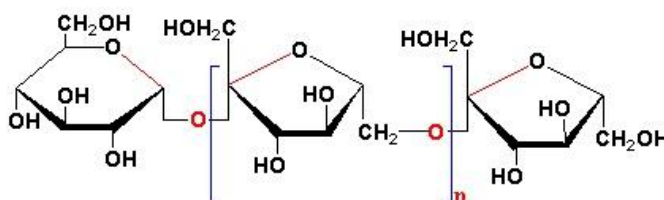
C

FONTE: RAIN TREE NUTRITION, 1996; BOLLA, 2009; ASHPAMAMA, 2011.

Geralmente, os tubérculos são consumidos crus. As raízes e folhas são também utilizadas para alimentar gado e suínos. A planta é de crescimento anual e apresenta nomes distintos conforme a região de cultivo: em espanhol, *yacon* ou *arboloco*; em inglês, *leafcup* ou *yacon strawberry*; em francês, *poir de terre Cochet*. O yacon é nativo da Colômbia, Equador e provavelmente também do Peru. É cultivado ao nível do mar no Peru, Nova Zelândia e Estados Unidos, e nas montanhas andinas pode ser encontrado em altitudes de até 3.300 m. No estágio inicial de crescimento, a planta requer água. Num segundo estágio, é capaz de suportar períodos de seca. A temperatura ótima de crescimento do yacon é entre 12°C e 22°C. O uso da planta de yacon é diversificado: de suas raízes pode ser extraído amido, para utilização na indústria de alimentos e alimentação animal; de suas folhas podem ser extraídas vitaminas para uso em alimentação animal; e ainda, seus tubérculos podem ser utilizados como fonte alternativa de edulcorante (FAO, 2007).

GOTO et al. (1995) desenvolveram um estudo muito importante para a pesquisa relacionada ao yacon, uma vez que isolaram e caracterizaram a estrutura química do frutooligossacarídeos (FOS) do yacon. Segundo estes autores, os oligossacarídeos do yacon consistem em moléculas de três a dez açúcares, com predominância de trissacarídeos. Sua hidrólise resulta em moléculas de glucose e frutose. Sua estrutura consiste em unidades repetidas de  $\beta$ -D-frutofuranosil unidos por ligações 2-1, com uma molécula de sacarose terminal. Esta estrutura química faz com que os oligossacarídeos do yacon sejam classificados como oligofrutas do tipo inulina. Na Figura 2 é apresentada a estrutura química mais básica dos oligossacarídeos do yacon.

FIGURA 2: ESTRUTURA QUÍMICA DA 1-CESTOSE, O MAIS SIMPLES DOS FOS.



FONTE: HILDEBRAND, 2004.

LACHMAN, FERNÁNDEZ e ORSÁK (2003) realizaram uma revisão de literatura sobre o yacon, abrangendo principalmente sua composição química e seu potencial de uso na alimentação humana. Segundo os autores, pelo menos 70% da massa dos tubérculos frescos corresponde à água, o que faz do yacon um alimento de baixo valor energético. Em relação à matéria seca, 70% a 80% são constituídos de sacarídeos, principalmente FOS. Os sacarídeos do yacon são considerados como o adoçante ideal para portadores de diabetes, devido ao alto teor de frutose, que é metabolizada no corpo humano mais lentamente e mais completamente do que a glucose. Além disso, há relatos de que o consumo do yacon auxilia no tratamento de problemas renais e no rejuvenescimento da pele. Os FOS têm recebido bastante atenção como fonte de prébióticos, uma vez que são pouco utilizados no organismo e apresentam a propriedade de aumentar o crescimento de microrganismos próbióticos. Os próbióticos são microrganismos que estão presentes no cólon e combatem as bactérias patogênicas. Os prébióticos são substâncias que servem de alimento para estes microrganismos. O mesmo estudo ainda relata que o yacon apresenta 2030 mg/kg de compostos fenólicos, com predominância de ácido clorogênico. Dentre os produtos alimentícios à base de yacon, há relatos de fatias de yacon desidratado por ar quente, yacon fermentado, chips de yacon, suco clarificado e vinagre.

PEDRESCHI et al. (2003) mostraram que bactérias probióticas das espécies *Lactobacillus* e *Bifidobacterium* são capazes de utilizar os FOS do yacon como fonte de carbono através da fermentação anaeróbica. Observou-se que tais bactérias utilizam FOS comerciais e FOS do yacon de maneira similar. Os autores concluíram que os FOS do yacon apresentam potencial de serem utilizados como prebióticos na indústria de alimentos e suplementos alimentares.

SIMONOVSKA et al. (2003) investigaram a presença de ácidos fenólicos no yacon, constatando que os principais compostos presentes são o ácido clorogênico, o ácido ferúlico e o ácido caféico. Os tubérculos de yacon constituem uma rica fonte de ácidos fenólicos e outras substâncias antioxidantes. TAKENAKA et al. (2003) encontraram cinco derivados do ácido caféico nos tubérculos de yacon. Os resultados sugerem que o yacon não é somente um alimento saudável pelos FOS que contém, mas também por ser fonte de compostos antioxidantes. YAN et al. (1999) detectaram atividade antioxidante de extratos alcoólicos de tubérculos de yacon sobre o 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH). A atividade antioxidante dos tubérculos foi atribuída ao L-triptofano e principalmente ao ácido clorogênico.

LACHMAN et al. (2004) estudaram a influência da variedade, ano de cultivo, porção da planta e tempo de armazenamento sobre os teores de sacarídeos do yacon. Diferentes

variedades apresentaram diferentes concentrações de inulina, frutose, sacarose e glucose. Tubérculos de diferentes safras apresentaram concentrações distintas de inulina e frutose, o que não foi observado para glucose e sacarose. As concentrações de inulina e frutose nos tubérculos foram superiores à observada nos rizomas, enquanto a concentração de glucose foi similar. Houve predominância de inulina ao começo do armazenamento. Já ao final do armazenamento, observou-se predominância dos monossacarídeos frutose e glucose e do dissacarídeo sacarose. Este comportamento foi atribuído à hidrólise da inulina conforme aumenta o tempo de armazenamento.

GRAEFE et al. (2004) investigaram o efeito de diferentes condições de armazenamento (sob o sol ou sob a sombra) sobre a composição em carboidratos de tubérculos de yacon. Conforme aumentou o tempo de armazenamento sob a sombra, houve uma redução acentuada da concentração de FOS e um aumento na concentração de frutose. Este comportamento foi atribuído à quebra das moléculas de FOS em frutose. O índice de refração dos tubérculos não variou durante o armazenamento sob a sombra, evidenciando uma desidratação insignificante. Já durante o armazenamento sob o sol, houve um aumento do teor de sólidos solúveis e perda de 40 % da massa inicial por desidratação. O yacon armazenado sob altitudes da ordem de 1000 m sofreu maior conversão de FOS em monossacarídeos quando comparado ao yacon armazenado sob altitudes de cerca de 2000 m. Tal comportamento foi atribuído à maior atividade enzimática sob baixa altitude, devido à maior temperatura ambiente.

MOSCATTO et al. (2006) otimizaram a formulação de um bolo de chocolate adicionado de farinha de yacon e inulina em função da textura. Para este fim, foi empregada a metodologia de superfície de resposta. A farinha de yacon foi obtida após descascamento, fatiamento, desidratação por ar quente à 50 °C e moagem. A caracterização da farinha mostrou que os componentes energéticos mais importantes são carboidratos. A análise de variância mostrou que a farinha de yacon foi o ingrediente que mais afetou a qualidade do bolo, especialmente a dureza. O bolo adicionado de farinha de yacon apresentou qualidade de textura tão alta quanto a formulação controle, mas com um melhor valor nutricional. Os resultados sugerem que o yacon desidratado apresenta potencialidade como ingrediente de panifícios funcionais.

NARAI-KANAYAMA, TOKITA e ASO (2007) investigaram quais as enzimas responsáveis pela conversão indesejável de FOS em açúcares simples durante o armazenamento de tubérculos de yacon. Com o avanço do armazenamento houve uma diminuição da concentração de FOS de baixo grau de polimerização (três a dez açúcares por

molécula) nos tubérculos de yacon. Este comportamento foi correlacionado com a ação das enzimas sacarose 1-frutossiltransferase, frutana 1-frutossiltransferase e, especialmente, a enzima frutana 1-exohidrolase. Embora tenha sido constatada a atividade de enzimas que hidrolisam inulina nos tubérculos, a maioria dos FOS de alto grau de polimerização foi preservada durante o armazenamento. Os resultados são importantes para a utilização comercial do yacon, uma vez que suas propriedades funcionais são decorrentes principalmente da presença dos FOS.

GEYER et al. (2008) avaliaram o efeito da administração de xarope de yacon sobre o trânsito do cólon de indivíduos saudáveis. O tempo de trânsito do bolo fecal diminuiu significativamente com a ingestão de xarope de yacon, não sendo observados efeitos colaterais do tratamento. Os autores concluíram que o yacon notadamente acelera o trânsito do bolo fecal no cólon em indivíduos saudáveis. Além disso, a ingestão de xarope de yacon é potencialmente útil para portadores de diabetes e obesos que sofrem de constipação, uma vez que apresenta um baixo valor calórico.

PARK et al. (2009) estudaram o efeito do extrato de tubérculos de yacon sobre a glicemia de cobaias. Foi observado um efeito hipoglicêmico significativo após a administração oral de extrato de tubérculos de yacon em cobaias. O colesterol total e a concentração de triglicerídeos também diminuíram significativamente em cobaias tratados com o ácido clorogênico constituinte do extrato de yacon. A atividade antioxidante do ácido clorogênico sobre o DPPH mostrou-se similar ao efeito da vitamina E, utilizada como controle.

## 2.2 SECAGEM

A secagem é provavelmente um dos mais antigos métodos de preservação de alimentos. Milhares de anos de métodos de tentativa e erro, bem como pesquisas nas últimas centenas de anos, resultaram no desenvolvimento de uma variedade de métodos e equipamentos de secagem. O processo de secagem é indispensável em muitos setores da indústria de alimentos devido ao aumento da vida de prateleira, custo de embalagem reduzido, menor peso no transporte e propriedades sensoriais únicas do produto final (MUJUMDAR, 2006; LEWICKI, 2006). A secagem é uma das mais importantes operações unitárias na engenharia de alimentos. Trata-se de uma maneira exequível de aumentar a vida de prateleira de alimentos de alto teor de umidade, em especial frutas e vegetais. Isto se dá pela redução do conteúdo de água do alimento a ponto de minimizar o crescimento microbiano e as reações

químicas indesejáveis (RUIZ-LÓPEZ et al., 2008).

MOURA (2004), membro de nosso grupo de pesquisa, estudou a secagem osmoconvectiva de fatias de yacon. Dentre as diferentes condições de processo testadas, a autora observou que a desidratação osmótica deve ser conduzida a 30°C, a espessura das fatias deve ser 5 mm e a solução desidratante (água + sorbitol) deve apresentar concentração de 50° Brix. Sob estas condições de processo foi observada a maior retirada de água e a menor perda de sólidos do produto. O pré-tratamento osmótico diminuiu o tempo de secagem convectiva e resultou em maior perda de água ao final. As melhores condições de secagem convectiva foram uma temperatura de 70° C, espessura de 2 mm e concentração de sólidos no pré-tratamento osmótico de 35 a 50° Brix.

TRONCOSO e PEDRESCHI (2007) estudaram a modelagem matemática da textura de fatias de batata desidratadas por ar quente. A variável resposta utilizada foi a força máxima, um parâmetro adimensional que reflete a textura das batatas durante o período de secagem. Observou-se que a força máxima diminui de valor com o avanço da secagem. No início da secagem, a força máxima diminui devido às avarias na superfície do produto e continua diminuindo devido ao colapso da estrutura do vegetal. Ao final da secagem, observa-se um aumento da força máxima devido à formação de uma crosta crocante. Quanto mais alta a temperatura, maiores os valores de força máxima. Observou-se que durante a secagem de batatas a etapa de amaciamento é predominante, em detrimento da etapa de endurecimento. Modelos caracterizados por duas reações químicas irreversíveis apresentaram um ajuste adequado dos dados.

VEGA-GÁLVEZ et al. (2008) estudaram e modelaram a cinética de transferência de água durante o processo de secagem por ar quente de fatias de maçã. O valor de umidade de equilíbrio foi utilizado no cálculo do valor da variável resposta ao longo da secagem, denominada razão entre umidades (equação 1).

$$MR = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}}$$

equação (1)

Onde:

$X_{wt}$  é a umidade do produto no tempo t

$X_{we}$  é a umidade de equilíbrio

$X_{wo}$  é a umidade inicial do produto

Observou-se que as cinéticas de secagem comportaram-se de maneira exponencial. A

modelagem das cinéticas foi realizada com os modelos de Newton (O'CALLAGHAN, MENZIES e BAILEY, 1971), Henderson-Pabis (HENDERSON e PABIS, 1961), Page (PAGE, 1949) e Page modificado (OVERHULTS et al., 1973), mostrados a seguir.

Modelo de Newton:

$$MR = \exp(-k_1 t)$$

equação (2)

Modelo de Henderson-Pabis:

$$MR = a \exp(-k_2 t^n)$$

equação (3)

Modelo de Page:

$$MR = \exp(-k_3 t^n)$$

equação (4)

Modelo de Page modificado:

$$MR = \exp((-k_4 t)^n)$$

equação (5)

Onde a,  $k_i$  e  $n_i$  são os parâmetros de cada modelo.

Os testes estatísticos utilizados para verificar a precisão dos modelos no ajuste da cinética foram o coeficiente de determinação, o qui-quadrado, soma dos erros quadrados e raiz quadrada dos erros quadrados médios. Observou-se que o melhor modelo para ajustar a cinética de secagem das fatias de maçã foi o modelo de Page modificado, provavelmente porque este modelo incorpora o parâmetro “n” na forma exponencial, provendo uma melhor estimativa matemática dos dados experimentais.

OLIVEIRA et al. (2009) estudaram a desidratação de microalgas da espécie *Spirulina platensis* com ar quente, avaliando os efeitos da temperatura de secagem e da quantidade de material por unidade de área interna do secador ( $\text{kg/m}^2$ ) sobre a qualidade do produto final. Observou-se que a secagem mais adequada foi aquela onde se utilizou a temperatura mais alta ( $60^\circ\text{C}$ ) e a menor quantidade de material por área interna do secador ( $4,0 \text{ kg/m}^2$ ). Tais condições de processo resultaram em menor tempo de secagem e menor alteração do produto.

SCHER, RIOS e NOREÑA (2009) estudaram a influência do pré-tratamento de

branqueamento e da temperatura do ar de secagem sobre a umidade, a atividade de água e a concentração de sacarídeos de fatias de yacon. A aplicação do branqueamento resultou em maior remoção de água por unidade de tempo. Tal comportamento foi atribuído à destruição da membrana celular e ao aumento da porosidade decorrentes do efeito do vapor de branqueamento. Dentre as temperaturas utilizadas (50 °C, 60 °C e 70 °C) observou-se que quanto maior a temperatura de secagem, maior foi a taxa de remoção de água, conforme o esperado. Os resultados obtidos sugerem que o uso de temperaturas mais altas (70 °C) causou a conversão de FOS em açúcares redutores. A concentração de inulina diminuiu com a aplicação da secagem, provavelmente devido à hidrólise, uma vez que as concentrações de glucose e frutose (monômeros que compõe a inulina) aumentaram significativamente durante o processo.

KOTOVICZ (2011), membro de nosso grupo de pesquisa, otimizou a secagem osmoconvectiva do yacon em função da perda de água, da incorporação de sólidos, do tempo de secagem e da atividade de água do produto final. A autora observou que as condições ótimas de desidratação osmótica foram: utilização de revestimento de alginato de sódio, concentração da solução osmótica (água + frutose) de 68 °Brix e temperatura de 30 °C. O uso destas condições de processo leva à maior perda de água e menor incorporação de sólidos. Na secagem convectiva, quanto maior a temperatura empregada, menor foi o tempo de secagem observado e mais rápida foi a diminuição da atividade de água.

### 2.2.1 Secagem a Vácuo

Na secagem a vácuo, a remoção de umidade do alimento ocorre a baixas pressões. Uma fina camada de alimentos é colocada em contato com uma superfície aquecida, que promove a transferência de calor latente necessário para a evaporação da água do alimento (JAYA e DAS, 2003). Um exemplo de equipamento para a secagem a vácuo é a estufa a vácuo. Neste equipamento, uma estufa que contém uma placa aquecida é conectada a uma bomba de vácuo. O vácuo causa a expansão do ar e do vapor d'água presentes no alimento, dando origem a uma estrutura fofa e inflada. Esta estrutura expandida prove uma alta razão área/volume, que resulta em altas taxas de secagem (JAYA e DAS, 2003). A secagem a vácuo apresenta diversas vantagens quando comparada à secagem convencional, em especial a temperatura inferior atingida no produto e a ausência de ar, reduzindo a oxidação do produto (BEAUDRY et al., 2004).

A secagem a vácuo é o processo mais adequado para desidratar alimentos como frutas



e vegetais, uma vez que altas temperaturas poderiam causar danos às propriedades do material (ZHANG et al., 2003). Como o ponto de ebulição diminui com a diminuição da pressão, a secagem a vácuo pode ser conduzida a temperaturas inferiores às utilizadas na secagem convencional. A secagem a vácuo é um método alternativo à liofilização e em comparação à esta, consome menos energia, uma vez que a energia requerida para evaporação da água é menor do que a requerida para sublimação do gelo. Consequentemente, a secagem a vácuo apresenta-se mais barata do que a liofilização (FOERST e KULOSIK, 2007).

MADAMBA e LIBOON (2001) otimizaram a secagem a vácuo de aipo utilizando a metodologia de superfície de resposta. As variáveis independentes utilizadas foram a espessura das fatias, a temperatura de secagem e a pressão de vácuo. As respostas estudadas foram o coeficiente de reidratação, a densidade, a umidade final e a aceitabilidade sensorial. Um modelo polinomial de segunda ordem mostrou-se adequado na predição de todas as respostas com exceção da aceitabilidade sensorial. As condições ótimas de secagem foram 74,5°C de temperatura, 1 mm de espessura das fatias e 59.262 Pa de pressão de vácuo absoluta.

JAYA e DAS (2003) estudaram a influência da espessura da camada de polpa de manga e da temperatura de secagem a vácuo sobre a umidade, difusividade da água, tempo de secagem e cor do produto final. Observou-se que o aumento da espessura e da temperatura causou aumento da difusividade efetiva da água. O aumento da espessura da amostra provocou o aumento do tempo de secagem. O aumento da temperatura causou a diminuição do tempo de secagem para todas as espessuras estudadas. Em relação às mudanças de cor, observou-se que espessuras maiores e temperaturas de secagem mais elevadas provocaram maiores mudanças de cor no produto final. Em conclusão, os autores relatam que, para se obter um produto final de qualidade ideal, a camada de polpa deve apresentar espessura máxima de 2,6mm e a temperatura máxima de secagem não deve exceder os 72,3 °C.

ZHANG et al. (2003) estudaram a otimização da secagem a vácuo de frutos de pimenta. Foram avaliados os efeitos da temperatura de secagem, pH de branqueamento e tempo de branqueamento sobre o teor de selênio e o de clorofila do produto final. O pH de branqueamento exerceu o efeito mais significativo sobre o teor de selênio, enquanto a temperatura de secagem exerceu o efeito mais significativo sobre o teor de clorofila. Já o tempo de branqueamento foi o fator que menos influenciou as respostas. As condições ótimas de secagem encontradas foram uma temperatura de secagem de 75 °C, pH de branqueamento de 7,0 e tempo de branqueamento de 8 minutos.

BEAUDRY et al. (2004) realizaram um estudo comparativo de secagem por ar quente,

a vácuo, liofilização e por micro-ondas de frutos de oxococos (*cranberries*). A secagem por ar quente resultou em produtos finais com a melhor aparência. Já a liofilização originou produtos com as melhores taxas de reidratação. A secagem a vácuo originou um produto final com capacidade de reidratação similar à da secagem por ar quente e da secagem por micro-ondas. A cor não foi diferentemente afetada pela variação dos métodos usados, assim como a textura. No entanto, as amostras liofilizadas apresentaram rigidez abaixo das demais.

DEVAHASTIN et al. (2004) compararam o efeito da secagem a vácuo e da secagem com vapor superaquecido à baixa pressão sobre a qualidade de cubos de cenoura. Quanto maior foram o vácuo e a temperatura de secagem utilizados, menores foram os tempos de secagem. A temperatura exerceu uma influência maior sobre o tempo de secagem do que a pressão. A secagem a vácuo demandou menos tempo do que a secagem com vapor superaquecido. A secagem com vapor superaquecido deu origem a produtos com maior taxa de reidratação e de cor mais bem preservada. Por outro lado, a densidade e o encolhimento do produto final foram similares para as duas técnicas estudadas. A pressão de vácuo utilizada exerceu apenas um pequeno efeito sobre a cor das amostras.

REIS, MASSON e WASZCZYNSKYJ (2006) estudaram os efeitos comparados de duas técnicas de secagem, por ar quente e a vácuo, sobre parâmetros de qualidade do produto final. As curvas de cinética de secagem foram adequadamente ajustadas ( $R^2 > 0,95$ ) por um modelo exponencial para os dois processos estudados. As taxas de secagem no processo por ar quente foram maiores do que para a secagem a vácuo. Além disso, a cor do produto final foi mais bem preservada no processo convectivo. Por outro lado, a taxa de reidratação das fatias de berinjela desidratadas a vácuo mostrou-se superior àquela associada ao processo convectivo. Algumas propriedades de cor apresentaram correlação forte e significativa com a cinética de secagem, sugerindo que a cor varia linearmente com a umidade durante os processos estudados. Tais resultados sugerem a possibilidade de substituição de medidas de umidade pelas de medidas cor ao longo do processo.

THOMKAPANICH, SUVARNAKUTA e DEVAHASTIN (2007) compararam os efeitos da secagem a vácuo e da secagem com vapor superaquecido à baixa pressão sobre parâmetros de qualidade de fatias de banana. Foram utilizadas as temperaturas de 70 °C, 80 °C e 90 °C e a pressão de 7.000 Pa durante os experimentos. A qualidade do produto final foi expressa pela cor, textura, encolhimento e teor de ácido ascórbico. Os autores observaram que quando a alimentação de vapor e a bomba de vácuo foram desligadas, o oxigênio que entrou na cabine prejudicou a qualidade do produto. Conforme esperado, as temperaturas mais altas promoveram uma maior taxa de secagem, devido a maiores valores de difusividade da água. A

secagem a vácuo foi mais vantajosa no que tange ao tempo de secagem do que a secagem com vapor superaquecido à baixa pressão. Contudo, no que diz respeito às mudanças de cor do produto, observou-se que a secagem a vácuo foi menos vantajosa. O efeito da temperatura de secagem sobre o escurecimento foi bastante claro, sendo maiores as mudanças de cor com o aumento da temperatura. Em relação à textura do produto final, observou-se que quanto maior a temperatura utilizada, maior a dureza observada.

SAHARI, HAMIDI-ESFEHANI e SAMADLUI (2008) estudaram a otimização da secagem a vácuo de frutos de tâmara em função da qualidade do produto final. Inicialmente, foram testadas diversas condições de temperatura (entre 68 °C e 100 °C) e pressão (entre 80,13 kPa e 20,4 kPa), tendo sido escolhidas a temperatura de 84 °C e a pressão de 72,79 kPa. Após a otimização preliminar, foram otimizadas a espessura de alimento (1 cm) e o tempo de secagem (7 horas). Quando utilizadas, tais condições levaram à redução apropriada de umidade, menor consumo de energia e maior viabilidade econômica. Temperaturas superiores à ótima causaram danos à qualidade sensorial do produto. Por outro lado, o uso de temperaturas inferiores à ótima resultou em tempos muito elevados de secagem. O tempo de secagem aumentou com o aumento da espessura das fatias. A melhor cor e o melhor odor foram observados quando as condições ótimas foram empregadas.

AMELLAL e BENAMARA (2008) estudaram a secagem a vácuo de frutos de tâmara sob diferentes temperaturas (60, 80 e 100 °C). Os dados foram modelados com os modelos de Newton (equação 3) e Henderson-Pabis (equação 4). Conforme o esperado, o uso de temperaturas mais altas resultou em menor tempo de secagem. O modelo de Henderson-Pabis mostrou-se mais adequado para descrever o comportamento do material ao longo da secagem, com maiores valores de coeficiente de determinação. Utilizando o modelo de Henderson-Pabis, os autores calcularam os coeficientes difusivos, cujos valores mostraram-se dentro da faixa usual para alimentos. Em conclusão, os autores observaram que a secagem a vácuo foi efetiva na remoção de umidade e não causou alteração indesejável na cor do produto.

RAHMAN et al. (2009) estudaram o efeito de diferentes tipos de secagem (por ar quente, a vácuo e por nitrogênio) sobre o potencial de alicina, uma molécula presente no alho que apresenta propriedades funcionais. Altas temperaturas diminuíram o potencial de alicina, sendo que para o processo a vácuo, a temperatura máxima que deve ser utilizada é de 60 °C. O aumento das temperaturas de secagem diminui o tempo do processo devido ao aumento da difusividade. Por outro lado, altas temperaturas de secagem destroem a alicina. Além disso, amostras de maior espessura perderam menos atividade de alicina do que aquelas menos espessas, devido aos menores danos causados pela secagem em fatias mais espessas.

REIS, LENZI e MASSON (2011) investigaram a influência de condições variáveis de secagem a vácuo sobre a qualidade de fatias de yacon. A espessura das fatias, a temperatura de secagem e a concentração de ácido cítrico na solução de inibição enzimática foram os fatores estudados. As respostas estudadas foram a cor e a textura de fatias de yacon. Foi efetuada a otimização, com restrição às condições experimentais, do processo de secagem no sentido de qualidade de cor do produto. A cor foi expressa nos espaços  $L^*a^*b^*$  e  $L^*C^*h^*$  e a textura foi expressa pelo parâmetro dureza. Observou-se que o avanço da secagem promoveu uma diminuição dos valores de  $L^*$  e um aumento dos valores de  $a^*$  e  $b^*$ . A dureza das fatias variou pouco nos estágios iniciais de secagem, seguido de amaciamento e ao final, endurecimento. Os efeitos dos fatores sobre as respostas  $L^*$ ,  $b^*$  e  $C^*$  foram adequadamente ajustado por modelos polinomiais. A qualidade ideal de cor do produto foi representada por altos valores de  $L^*$  (baixo escurecimento), altos valores de  $b^*$  (cor amarela dourada) e altos valores de  $C^*$  (alta saturação de cor). Estas características podem ser obtidas no produto final quando altas temperaturas, baixas espessuras e altas concentrações de ácido cítrico são utilizadas em combinação.

## 2.3 TEORIA FRACTAL

Fractais são figuras geométricas que podem apresentar dimensão fracionária, como por exemplo, uma dimensão entre um (dimensão de uma curva) e dois (dimensão de uma região aberta). Portanto, a principal característica dos fractais é que não obedecem à geometria euclidiana, que é aplicável unicamente para figuras de dimensões representadas por números inteiros. Tipicamente, um fractal apresenta-se irregular, mesmo após a magnificação de sua imagem (MANDELBROT, 1983). A geometria fractal envolve a aplicação de metodologias para obter a dimensão fractal, não apenas para objetos, mas também para diversos fenômenos encontrados na natureza e nos processos. Uma das vantagens de se utilizar a análise fractal de imagens de superfícies de alimentos é que ela possibilita informações numéricas que podem ser utilizadas na engenharia de alimentos e áreas afins (CHANONA et al., 2003). A título de ilustração, na figura 3 é apresentado um fractal denominado floco de neve de Koch, cuja dimensão fractal é de 1,26186 (WEISSTEIN, 2011):

FIGURA 3: FRACTAL FLOCO DE NEVE DE KOCH



FONTE: WEISSTEIN, 2011.

CHANONA et al. (2003) estudaram a modelagem por teoria fractal da estrutura física e da distribuição da temperatura em um alimento modelo gelificado. Observou-se que a distribuição da temperatura no alimento obedeceu a uma cinética não linear, conforme evidenciado por valores de dimensão fractal diferentes de “1”. Pela análise de imagem da estrutura das placas de alimento, observou-se que o avanço da secagem deu origem a estruturas cada vez mais irregulares, e conseqüentemente a valores crescentes de dimensão fractal. Além disso, maiores temperaturas e velocidades do ar de secagem resultaram em maiores valores de dimensão fractal. Neste caso, a dimensão fractal pode ser considerada um indicador quantitativo da heterogeneidade do material.

KERDPIBOON, KERR e DEVAHASTIN (2006) utilizaram a análise fractal para quantificar mudanças na microestrutura de cubos de cenoura durante a secagem. Os autores desenvolveram modelos para prever as propriedades físicas de cenoura desidratada, mais especificamente a porcentagem de encolhimento e a razão de reidratação. As técnicas de secagem utilizadas foram a secagem por ar quente, por vapor superaquecido à baixa pressão e liofilização. Observou-se que tempo mais elevados de secagem resultaram em maior encolhimento e maior aspereza das cenouras. Com o avanço da secagem, a dimensão fractal aumentou de valor. A dimensão fractal foi maior nas amostras desidratadas por ar quente, seguida da secagem por vapor superaquecido e liofilização. Observou-se que a porcentagem de encolhimento foi maior para a secagem por vapor superaquecido, seguido da secagem por ar quente e da liofilização. A razão de reidratação foi maior para o produto liofilizado, seguido pelo produto tratado com vapor e pelo produto seco por ar quente. Em conclusão, a dimensão fractal foi utilizada com sucesso para monitorar as mudanças nas propriedades físicas de cenoura durante a desidratação.

KERDPIBOON, DEVAHASTIN e KERR (2007) utilizaram a análise de imagem associada à teoria fractal para investigar relação entre mudanças macroestruturais e microestruturais em cubos e cenouras e batatas durante a secagem por ar quente. Em relação

às variáveis-resposta estudadas, observou que o encolhimento percentual foi maior durante os primeiros momentos de secagem, tendendo à estabilidade ao final. Este comportamento pode ser explicado pelo fenômeno de endurecimento da superfície, que inibe o encolhimento nos instantes finais do processo de secagem. Para a razão de reidratação, observaram-se valores mais altos durante o período intermediário do processo de secagem. Além disso, temperaturas mais altas resultaram em maiores razões de reidratação. Este comportamento pode ser explicado pelo maior dano estrutural associado às altas temperaturas, com rompimento de poros que facilita a reidratação posterior. Observou-se que a dimensão fractal das cenouras cruas foi de 1,75, e aumentou de valor com o avanço da secagem, chegando até 1,91. A dimensão fractal das batatas cruas foi de 1,61, chegando a um máximo de 1,73 com o avanço da secagem. A maior dimensão fractal observada para as cenouras foi justificada pelo fato de que estas apresentam maior gradiente de umidade durante a secagem. Consequentemente, maiores mudanças estruturais foram observadas nas cenouras em comparação às batatas. As taxas de mudanças da dimensão fractal puderam ser divididas em dois períodos: período de mudanças lineares e não lineares. A porcentagem de encolhimento, a cinética de secagem e a razão de reidratação apresentaram correlação forte e positiva com as mudanças no valor da dimensão fractal, que representa as mudanças microestruturais. Portanto, a dimensão fractal pode ser utilizada para monitorar as mudanças físicas macroestruturais de cenouras e batatas durante a secagem.

CAMPOS-MENDIOLA et al. (2007) estudaram o encolhimento de placas planas de batata durante a secagem convectiva e avaliaram as interfaces sólido-gás utilizando a análise de imagem e a teoria fractal. Analisando imagens da área lateral das placas planas observou-se um aumento no valor desta ao longo da secagem, que denuncia o encolhimento da amostra. A dimensão fractal das porções centrais da placa variou durante a secagem, atingindo um valor máximo (1,14) aos 40 minutos de secagem, e a partir deste momento decresceu, estabilizando-se ao final. O mesmo comportamento foi observado para a borda externa da placa, sugerindo que o fenômeno de encolhimento nas diferentes porções da placa é similar. Em conclusão, a dimensão fractal representou confiavelmente o encolhimento das fatias de batata.

FAGAN et al. (2008) modelaram a sinérese de queijo através de análises de textura por imagens, combinada com a geometria fractal. Observou-se que o valor de dimensão fractal correlacionou-se forte e negativamente com a umidade do coalho e forte e positivamente com o teor de sólidos do soro. Uma vez que estes parâmetros são utilizados para descrever o processo de sinérese, concluiu-se que a geometria fractal é capaz de prever com qualidade o

processo de sinérese do queijo. De fato, a geometria fractal mostrou-se a melhor abordagem para prever os parâmetros característicos da sinérese quando comparada com outros tipos de modelagem.

NIAMNUY, DEVAHASTIN e SOPONRONNARIT (2008) utilizaram a dimensão fractal para representar as mudanças microestruturais de camarões após sua imersão em soluções salinas em ebulição. Observou-se um aumento no valor da dimensão fractal com o tratamento de imersão. Este aumento foi mais significativo com o aumento do tempo de imersão e com o aumento da concentração de sal. O efeito do tempo de imersão sobre a dimensão fractal foi mais forte do que o efeito da concentração de sal. O aumento da dimensão fractal foi atribuído ao encolhimento das fibras musculares dos camarões. A dimensão fractal aumentou com o aumento da perda de massa pelo cozimento e da dureza dos camarões. Além disso, correlações fortes foram estabelecidas entre dimensão fractal e mudanças na composição proteica e nas propriedades físicas. Em resumo, observou-se que a dimensão fractal pode ser utilizada com confiabilidade na modelagem das mudanças microestruturais de camarões durante imersão em soluções salinas em ebulição.

QUEVEDO et al. (2009a) compararam o escurecimento enzimático de fatias de banana expresso através de medidas de cor tradicionalmente empregadas (escala  $L^*a^*b^*$ ) e através do cálculo da dimensão fractal. Foi observado um aumento da dimensão fractal das imagens com o avanço do escurecimento enzimático, simultaneamente a uma diminuição de  $L^*$  (luminosidade) e de  $b^*$  (tonalidade azul-amarela). O uso da teoria fractal mostrou que a distribuição da luminosidade na superfície das fatias com o escurecimento enzimático é heterogêneo, o que não é possível de se perceber pela medição de cores tradicional. De acordo com os resultados obtidos, a cinética de escurecimento não seguiu um modelo de primeira ordem, contrariando resultados anteriores. Os resultados mostraram que a teoria fractal pode ser utilizada para descrever a cinética de escurecimento enzimático em bananas. Resultados bastante similares foram observados para peras (QUEVEDO et al., 2009b) e maçãs (QUEVEDO et al., 2009c).

PÉREZ-NIETO et al. (2010) utilizaram a teoria fractal para modelar a aparência de massa de pão, através do cálculo da dimensão fractal durante o período de assadura da massa. Observaram-se três períodos distintos de assadura. Na primeira etapa a dimensão fractal oscilou entre um máximo de 2,76 até um mínimo de 2,54. Os maiores valores de dimensão fractal foram associados ao aumento do número de bolhas com o aquecimento, resultando em uma imagem mais irregular. Os menores valores de dimensão fractal foram associados à coalescência de bolhas, resultando a uma imagem mais plana. Na segunda etapa a dimensão

fractal oscilou entre um máximo de 2,75 até um mínimo de 2,59. Os maiores valores de dimensão fractal foram associados à expansão das bolhas menores do exterior para o centro da massa, resultando em uma imagem mais irregular. Os menores valores de dimensão fractal foram associados à coalescência de bolhas, resultando a uma imagem mais plana. Na última etapa de assadura os valores de dimensão fractal permaneceram constantes (2,70 a 2,72), como resultado da estabilização da estrutura física da massa. Em conclusão, a dimensão fractal foi empregada com sucesso para representar as mudanças microestruturais de massa de pão durante a assadura.

REIS et al. (2012) estudaram a cinética de secagem a vácuo de fatias de yacon, sua respectiva modelagem e o efeito das condições de processo sobre a taxa de reidratação e a dimensão fractal das amostras. A cinética de secagem foi ajustada a diversos modelos, sendo o modelo de Page modificado aquele que apresentou o melhor ajuste. A escolha do melhor modelo foi baseada na análise do valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro médio de predição. A dimensão fractal foi calculada pelo “Box counting method”, apresentando valores entre 1.59 e 1.83. Estes resultados confirmam que as micrografias das fatias de yacon são fractais, uma vez que apresentando dimensão entre 1 (de uma reta) e dois (de um plano). Observou-se que, dentre os fatores estudados (temperatura, espessura e concentração de ácido cítrico), a temperatura afetou negativamente a dimensão fractal e a espessura afetou negativamente a taxa de reidratação. Uma boa correlação foi obtida entre dimensão fractal e umidade, taxa de reidratação e ângulo de tom, sugerindo que estas medidas típicas de qualidade poderiam ser substituídas ou complementadas por uma análise de imagem.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados como matéria-prima para a obtenção de fatias de yacon tubérculos da safra de inverno do ano de 2010, adquiridos no Mercado Municipal de Curitiba, Paraná. Na formulação da solução de pré-tratamento de acidificação foram utilizados o ácido cítrico granular anidro, adquirido da empresa Tate & Lyle Brasil S.A. (São Paulo, Brasil) usado como recebido, e água destilada.

#### 3.2 Métodos

##### 3.2.1 Preparo da Matéria-prima

Os tubérculos foram selecionados pelo grau de sanidade no local de compra. No laboratório, os tubérculos foram descascados manualmente com uma faca para uso doméstico e imediatamente fatiados em três diferentes espessuras, 0,20 cm, 0,40 cm e 0,60 cm, utilizando-se um fatiador manual. A espessura das fatias foi aferida com um paquímetro.

##### 3.2.2 Pré-tratamento de Inibição do Escurecimento Enzimático

As fatias foram imersas durante três minutos em soluções de ácido cítrico às concentrações de  $0,20 \pm 0,01$  %,  $0,60 \pm 0,01$  % e  $1,00 \pm 0,01$  % (m/m) durante três minutos (SON, MOON e LEE, 2001). Após imersão, as fatias foram drenadas com uma peneira doméstica, gentilmente secas com papel toalha e acondicionadas de maneira a formar uma única camada em um recipiente de vidro termorresistente. O recipiente contendo as fatias foi inserido em uma estufa a vácuo.

##### 3.2.3 Secagem

As fatias de yacon foram desidratadas em uma estufa a vácuo Quimis QV319V6 (Diadema, Brazil) operando a 11.325 Pa de pressão absoluta. Para as amostras medindo 0,20 cm de espessura, medições de umidade, textura e cor foram realizadas a cada 30 minutos. Já para as amostras medindo 0,40 cm e 0,60 cm de espessura, medições de umidade, textura e cor foram realizadas a cada 60 minutos, uma vez que a variação das respostas em 30 minutos, nestas condições, era negligenciável, conforme observado em experimentos preliminares.

### 3.2.4. Medidas de Textura

Nos mesmos intervalos de tempo descritos no item anterior, foram realizadas medidas de textura das fatias de yacon. Para isto utilizou-se um texturômetro CT3 (Brookfield, Middleboro, EUA). A ponta de prova utilizada foi a TA 39, que consiste em um cilindro de aço inoxidável de comprimento 2 cm. Na maioria das medições, utilizou-se a base TA-BT-KIT. Contudo, quando as fatias apresentavam espessura muito baixa ( $\leq 0,2$  cm), a base TA-CJ foi utilizada. Esta base é recomendada pelo fabricante do equipamento para amostras de espessura muito baixa, uma vez que apresenta um orifício central que permite maior movimentação da ponta de prova no sentido vertical, evitando uma possível sobrecarga pelo contato entre a ponta de prova e a base. Testes de compressão foram efetuados utilizando-se o software TextureProCT® (Brookfield, Middleboro, EUA). As demais condições dos testes foram: 2 mm de penetração, carga de disparo de 10 g, velocidade de penetração de 2 mm/s e inserção da ponta de prova no eixo central da fatia. Estas condições de teste seguiram as recomendações do fabricante do equipamento para medição da textura de peras, com pequenas modificações. O parâmetro utilizado para expressar a textura das amostras foi a dureza (g).

### 3.2.5. Medidas de Cor

As fatias de yacon tiveram sua cor medida ao longo de intervalos de tempo citados anteriormente através de um espectrofotômetro de refletância MiniScan XE Plus (Hunter Associates Laboratory, Inc., Reston, EUA). A cor foi expressa nas escalas CIE  $L^*a^*b^*$  e CIE  $L^*C^*h^*$ , criadas pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 1986). A escala CIE  $L^*a^*b^*$  é composta pelas seguintes propriedades: luminosidade ( $L^*$ ) que varia entre 0 (preto) e 100 (branco); tonalidade verde-vermelha ( $a^*$ ), onde valores negativos correspondem ao verde e valores positivos correspondem ao vermelho; e tonalidade azul-amarela ( $b^*$ ), onde valores negativos correspondem ao azul e valores positivos correspondem ao amarelo. A escala CIE  $L^*C^*h^*$  é composta pelas seguintes coordenadas: luminosidade ( $L^*$ ), previamente descrita; saturação ( $C^*$ ), que corresponde ao grau de pureza de uma cor em relação à mistura com a cor cinza; e o ângulo de tom ( $h^*$ ), que representa as diferentes cores existentes. O iluminador D65, que representa a luz do sol média ao meio dia ao redor do mundo, e o ângulo do observador de  $10^\circ$ , que representa com máxima fidelidade a resposta de um olho humano, foram utilizados nos testes (HUNTERLAB, 2000).

### 3.2.6. Medidas de Umidade e Atividade de Água

Ao longo da secagem, nos intervalos de tempo pré-determinados, a massa das fatias de yacon foi medida em uma balança analítica BG 200 (Gehaka, São Paulo) com repetibilidade de 0,0002g. Além disso, fatias de yacon “in natura” foram submetidas à secagem a 105 °C até peso constante para determinar seu teor de umidade em base úmida. Então, assumiu-se que toda a massa perdida ao longo da secagem a vácuo consistia em água, e por uma regra de três simples obtiveram-se os valores de umidade ao longo de toda a secagem a vácuo.

A atividade de água foi utilizada para determinar o final do processo de secagem. Quando a perda de massa das fatias de yacon foi considerada negligenciável, mediu-se a atividade de água das mesmas em um medidor Aqualab (Decagon Devices, Pullman, EUA). Somente quando a atividade de água registrada mostrou-se inferior a 0,60, o processo de secagem foi interrompido. Este valor é suficiente para inibir todos os microrganismos mais comumente encontrados em alimentos, garantindo estabilidade do produto ao armazenamento (ROCKLAND e BEUCHAT, 1987).

### 3.2.7. Delineamento Experimental

Um delineamento fatorial com dois níveis e três fatores ( $2^3$ ) foi utilizado para avaliar a influência das condições de secagem sobre a cor, a textura, a taxa de reidratação e a dimensão fractal das amostras. As condições de secagem variáveis foram a espessura das fatias (fator 1), a concentração de ácido na solução de pré-tratamento (fator 2) e a temperatura de secagem (fator 3). As concentrações de ácido foram escolhidas com base em estudos anteriores (SON, MOON e LEE, 2001). Já as temperaturas de secagem foram escolhidas com base em estudos que relatam a destruição das fibras pré-bióticas do yacon acima de 65°C (SCHER, RIOS e NOREÑA, 2009). A Tabela 1 mostra os níveis codificados e não codificados dos fatores que foram utilizados.

TABELA 1: FATORES UTILIZADOS E SEUS RESPECTIVOS NÍVEIS CODIFICADOS E NÃO CODIFICADOS.

Fator	Nível		
	-1	Ponto central	1
Espessura da fatia (cm)	0,2	0,4	0,6
Concentração de ácido cítrico (g/100g solução)	0,2	0,6	1,0
Temperatura (°C)	45	55	65

A Tabela 2 mostra o delineamento experimental proposto expresso em variáveis codificadas.

TABELA 2: DELINEAMENTO FATORIAL COMPLETO PROPOSTO

Experimentos	Níveis das variáveis independentes codificadas		
	Espessura da fatia	Concentração de ácido	Temperatura
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

Os três últimos experimentos obedeceram aos pontos centrais do delineamento. Caso os valores das variáveis-resposta obtidos quando se utilizam as condições de processo dos pontos centrais sejam estatisticamente iguais, pode-se afirmar que a variabilidade do processo é aceitável (NIST/SEMATECH, 2003). Os experimentos foram executados em ordem aleatória definida por sorteio utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft, Tulsa, EUA).

As análises estatísticas foram executadas com os softwares Open Office 3.0 (Sun Microsystems, Redwood Shores, EUA) e Statistica 7.0. O nível de confiança de 95% foi o escolhido. Análise de variância e ajustes dos dados a modelos matemáticos foram realizados. O erro experimental foi calculado utilizando a equação 6, onde o desvio-padrão da média

(DPM) é calculado a partir da divisão do desvio-padrão da medida pela raiz quadrada do número de amostras:

$$DPM = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1}} \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \text{equação (6)}$$

Onde X é o valor de uma medida qualquer,  $\bar{X}$  é o valor da média e N é o número de amostras. Foi admitida a hipótese de erro constante. Foi realizada a triplicata do ponto central e admitida a mesma variância para todos os experimentos (PINTO e SCHWAAB, 2007).

### 3.2.8. Análise de Imagem e Cálculo da Dimensão Fractal

As fatias de yacon desidratadas tiveram sua imagem registrada através de um estéreo microscópio Discovery V12 (Carl Zeiss, Jena, Alemanha) utilizando um aumento de 10 vezes. As fotografias foram tiradas com uma câmera Zeiss Axioxcam IC c3. As imagens geradas foram processadas com o software Axiovision, versão LE 4.7.

A dimensão fractal foi calculada utilizando o método Box Counting (QUEVEDO et al., 2002), que consiste em encaixar um número Nr de caixas de tamanho r sobre a imagem e calcular a dimensão fractal (DF) com a seguinte equação:

$$DF = \frac{\log(Nr)}{\log(1/r)} \quad \text{equação (7)}$$

O software utilizado para o cálculo foi o IMAGE J versão 1.43U (National Institutes of Health, EUA). Os tamanhos das caixas utilizadas para calcular a DF foi 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 32 e 54 pixels.

### 3.2.9. Cálculo da Razão de Reidratação

As amostras desidratadas foram reidratadas segundo o método utilizado por KERDPIBOON, DEVAHASTIN E KERR (2007). Este método consiste em imergir as amostras secas em água em ebulição durante 10 minutos. O cálculo da razão de reidratação foi realizado utilizando a seguinte equação:

$$RR = \frac{M}{M_0}$$

equação (8)

onde RR é a razão de reidratação, M é a massa da amostra reidratada e  $M_0$  é a massa da amostra desidratada. A reidratação é uma opção para o consumidor que está interessado em consumir o yacon com características próximas às do yacon *in natura*. Quanto maior for a taxa de reidratação, maior a recuperação do estado original do produto.

### 3.2.10. Modelagem da Cinética de Secagem

A variação da umidade (b.u.) ao longo da secagem foi expressa através da razão entre umidades e ajustada por quatro modelos: o de Newton (equação 2), o de Henderson-Pabis (equação 3), o de Page (equação 4) e o de Page modificado (equação 5). Foram calculadas as constantes dos modelos e seu erro associado. O valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro percentual médio de predição foram utilizados para escolher o modelo mais adequado. O erro percentual médio de predição foi calculado inicialmente pela razão entre o erro de predição e o valor calculado do parâmetro multiplicada por 100. Então, a média das razões obtidas para os onze tratamentos forneceu o erro percentual médio de predição.

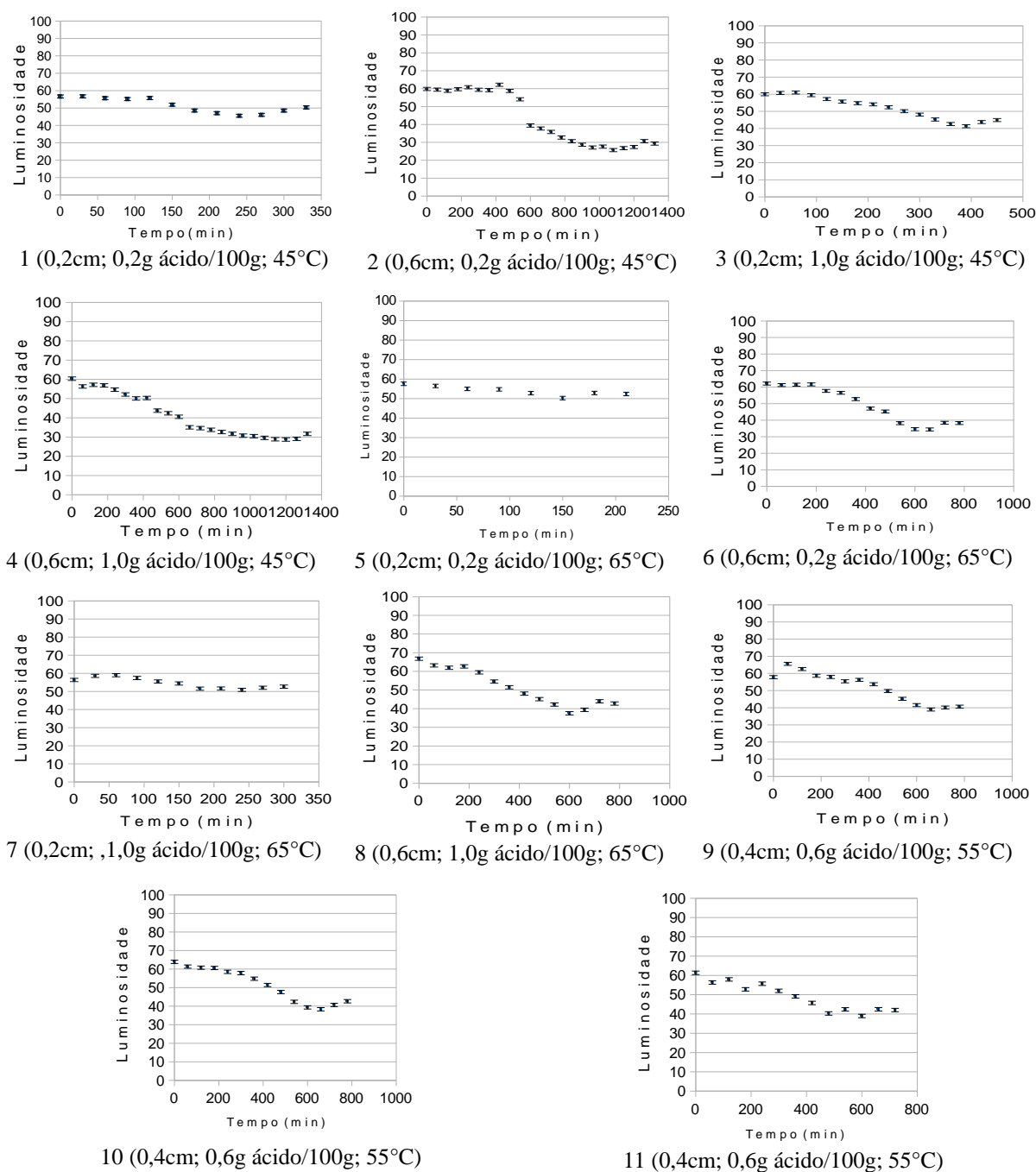
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 VARIAÇÃO DA COR AO LONGO DA SECAGEM

#### 4.1.1 Variação da Luminosidade ( $L^*$ ) das Fatias de Yacon ao Longo da Secagem

No Gráfico 1 é apresentada a variação da luminosidade ( $L^*$ ) das amostras processadas no experimentos 1 a 11 ao longo da secagem.

GRÁFICO 1: VARIAÇÃO DA LUMINOSIDADE ( $L^*$ ) DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.



Para todas as condições de secagem estudadas observou-se a diminuição da luminosidade das amostras ao longo da secagem. Isto significa que a amostra distanciou-se da cor branca (que equivale ao valor 100 da escala de luminosidade) e aproximou-se da cor preta (que equivale a 0 na escala de luminosidade).

Para todas as amostras, foi observado que nas duas últimas medições ocorreu um ligeiro aumento da luminosidade do yacon. Este comportamento deve-se provavelmente à entrada de luz ambiente entre a cabeça medidora do equipamento e a amostra, que ocorreu devido ao formato irregular e textura rígida da amostra ao final, atrapalhando o perfeito encaixe entre equipamento e amostra. Na Tabela 3 é apresentada a luminosidade final das fatias de yacon desidratadas.

**TABELA 3: VALORES DE LUMINOSIDADE (L\*) FINAL DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS A VÁCUO.**

Amostra	L* final
1 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	50,3480 ± 0,8618
2 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	29,3270 ± 0,8618
3 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	44,9080 ± 0,8618
4 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	31,6559 ± 0,8618
5 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	41,7033 ± 0,8618
6 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	38,2814 ± 0,8618
7 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	52,6281 ± 0,8618
8 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	42,7553 ± 0,8618
9 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	40,5964 ± 0,8618
10 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	42,6481 ± 0,8618
11 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	42,0402 ± 0,8618

Espessuras maiores, associadas a tempos mais longos de secagem, tornaram a amostra mais escura (L\* final menor), sendo este resultado similar ao observado por JAYA e DAS (2003) para fatias de manga desidratadas a vácuo.

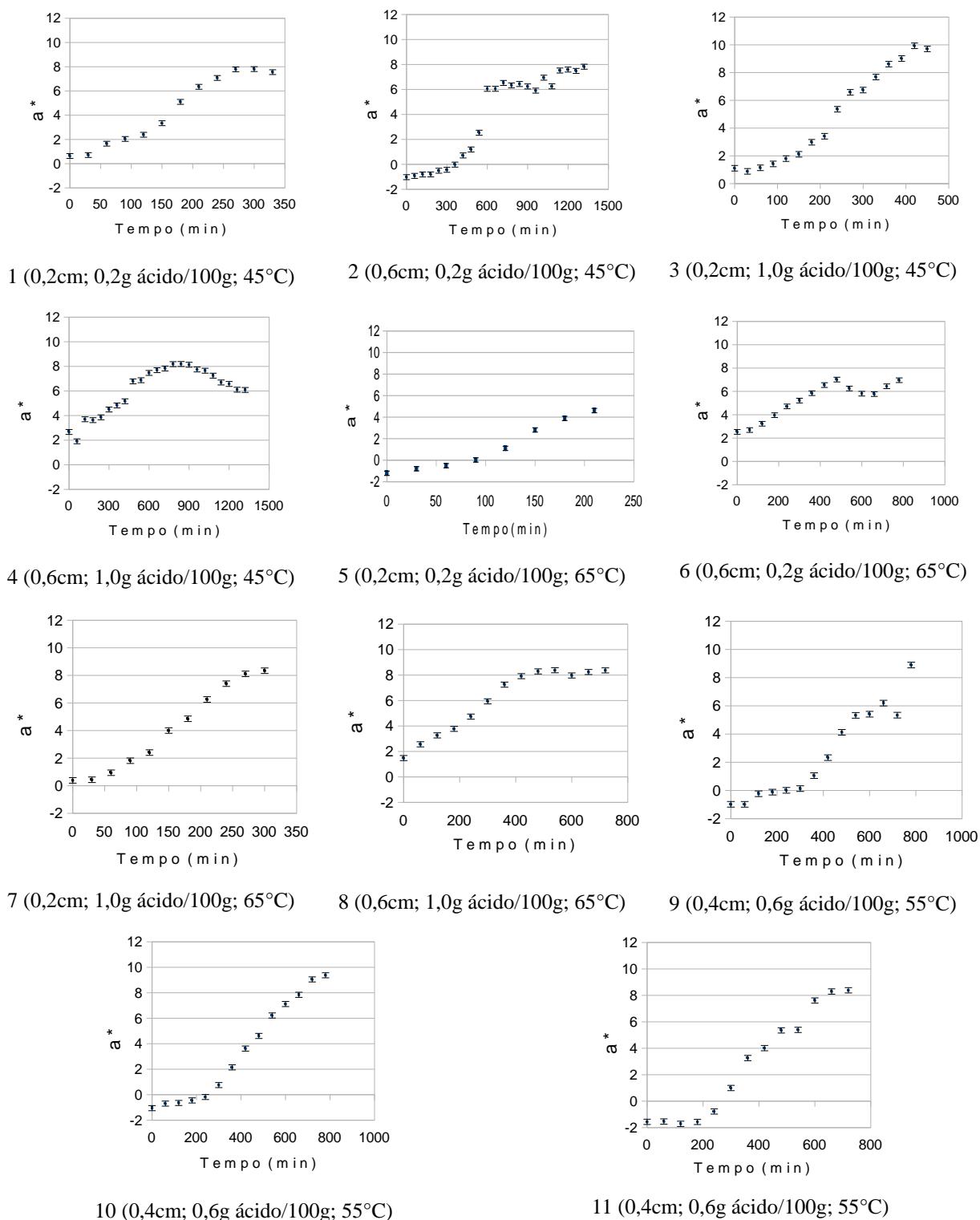
#### 4.1.2 Variação da Tonalidade Verde-vermelha (a\*) das Fatias de Yacon ao Longo da Secagem

Para todas as condições de secagem estudadas houve um aumento da tonalidade verde-vermelha (a\*) do yacon ao longo da secagem. Este resultado corrobora com aquele obtido por REIS, MASSON e WASZCZYNSKYJ (2006), onde foi estudado o efeito da secagem a vácuo



e por ar quente sobre a qualidade de fatias de berinjela, que são vegetais de polpa clara e alta atividade de água, assim como o yacon. Para ilustrar este comportamento, é mostrada no Gráfico 2 a variação da tonalidade verde-vermelha ( $a^*$ ) das fatias de yacon das amostras processadas nos experimentos de 1 a 11 ao longo do processo de secagem.

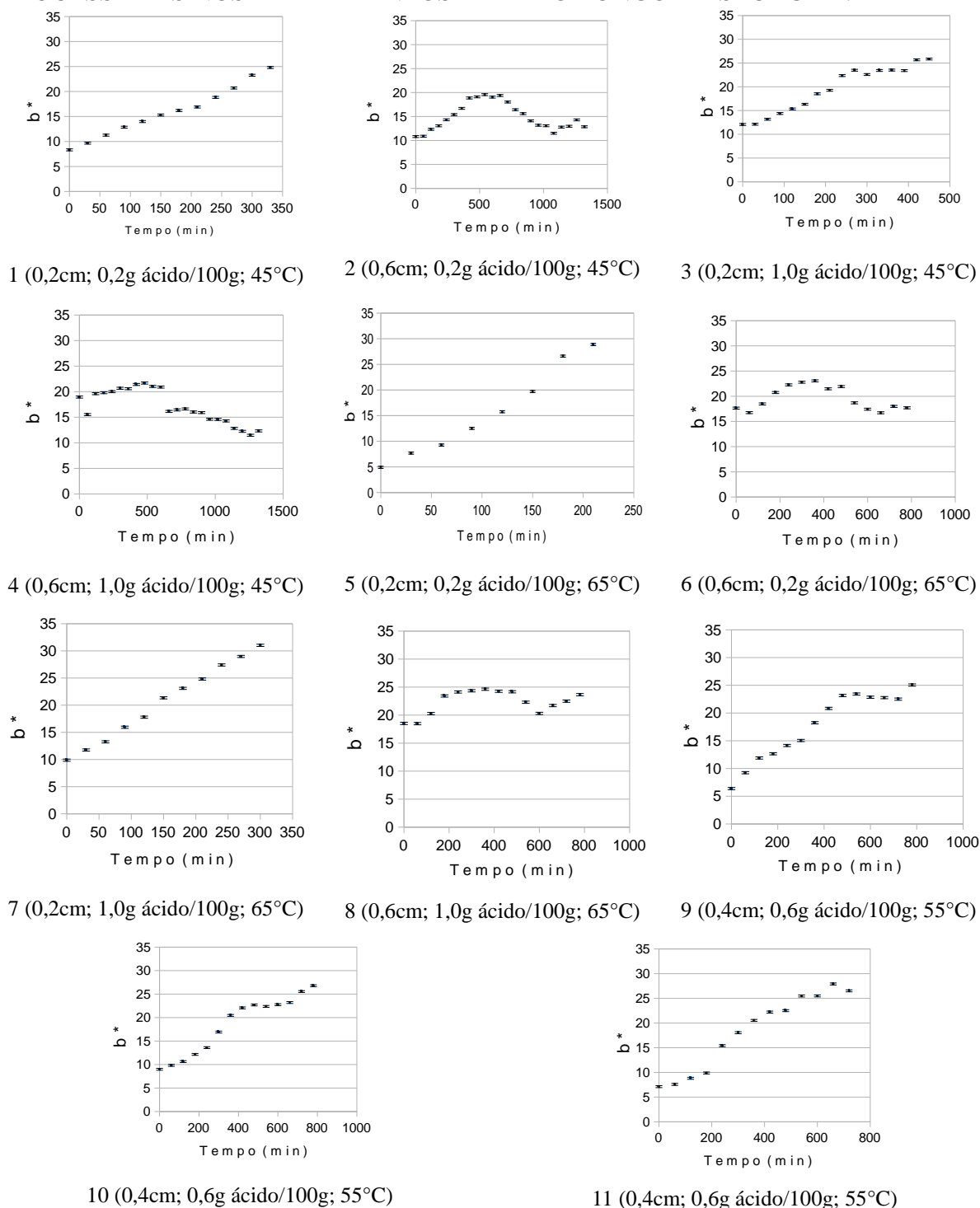
**GRÁFICO 2: VARIAÇÃO DA TONALIDADE VERDE-VERMELHA ( $a^*$ ) DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.**



#### 4.1.3 Variação da tonalidade azul-amarela das fatias de yacon ao longo da secagem

Para praticamente todas as condições de secagem estudadas, observou-se aumento da tonalidade azul-amarela das fatias ao longo do processo de secagem (Gráfico 3).

**GRÁFICO 3: VARIAÇÃO DA TONALIDADE AZUL-AMARELA ( $b^*$ ) DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.**



Este resultado corrobora com aqueles obtidos por BUNGER et al. (2004) durante a secagem de cubos de maçã, que são vegetais de polpa clara e alta atividade de água, assim como o yacon. O aumento da tonalidade azul-amarela torna a amostra mais apelativa do ponto de vista sensorial, sendo desejável para garantir a qualidade final do yacon desidratado.

Pode-se concluir, a partir dos resultados das medidas das variáveis  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , que com o avanço do processo de secagem ocorreu diminuição do valor de luminosidade ( $L^*$ ) e o aumento dos valores de tonalidade verde-vermelha ( $a^*$ ) e tonalidade azul-amarela ( $b^*$ ), repetindo os resultados obtidos por REIS, MASSON e WASZCZYNSKYJ (2006) para berinjelas desidratadas.

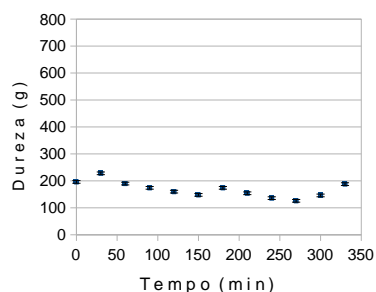
#### 4.2 VARIAÇÃO DA TEXTURA AO LONGO DA SECAGEM

Para todas as condições de secagem estudadas, observou-se um comportamento semelhante da textura ao longo da secagem. Observou-se que ao início da secagem, a dureza no centro das fatias, onde foram feitas as medições, permaneceu igual. Em tempos de secagem intermediários, observou-se o amaciamento das fatias. Ao final, a amostra voltou a apresentar alta dureza, como consequência do enrijecimento típico observado em produtos desidratados que reflete o surgimento de crocância nas amostras.

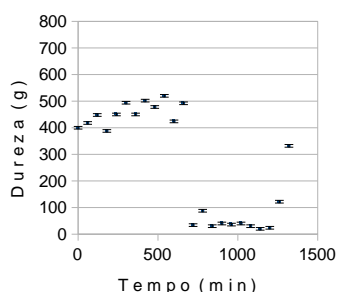
Segundo MOYANO, TRONCOSO e PEDRESCHI (2007), este comportamento pode ser atribuído à solubilização inicial do meio lamelar, que faz as células perderem turgor e a dureza diminuir. Ao final do processo de secagem, a temperatura do produto aumenta, levando à formação de uma crosta externa, endurecendo a amostra.

TRONCOSO e PEDRESCHI (2007) observaram durante a secagem de batatas que a etapa de amaciamento é predominante, em detrimento da etapa de endurecimento. Este comportamento também foi observado no presente estudo. Para ilustrar este comportamento, é mostrada no Gráfico 4 a variação da dureza das fatias de yacon ao longo da secagem para as amostras processadas nos experimentos 1 a 11.

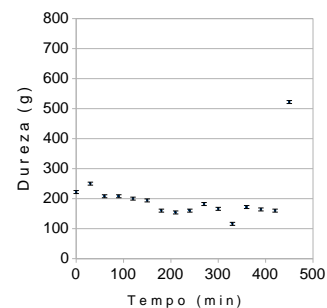
GRÁFICO 4: VARIAÇÃO DA DUREZA DAS AMOSTRAS PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS 1 A 11 AO LONGO DA SECAGEM.



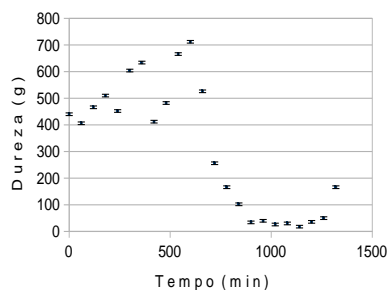
1 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)



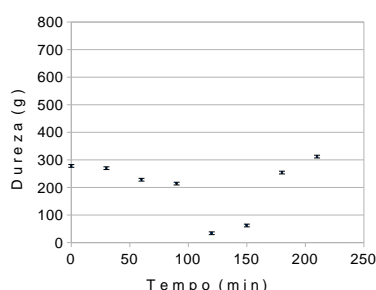
2 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)



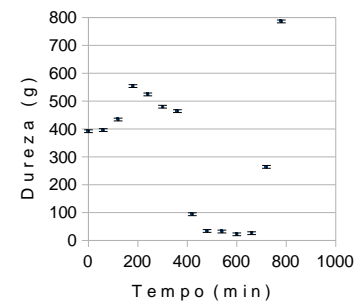
3 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)



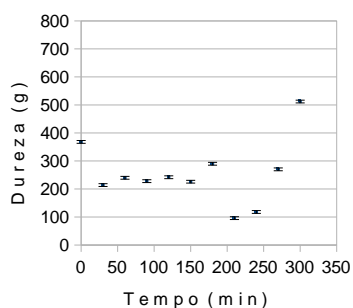
4 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)



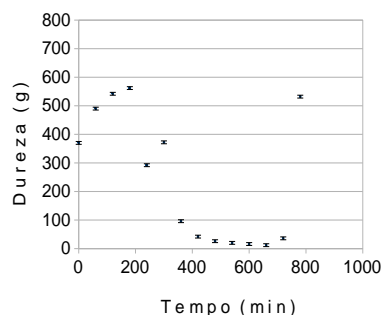
5 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)



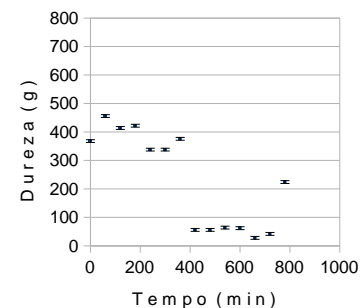
6 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)



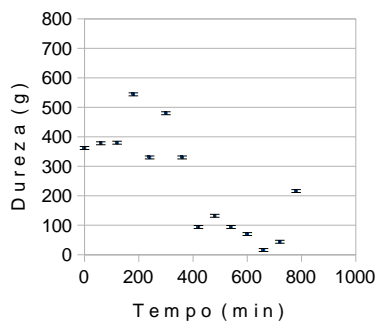
7 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)



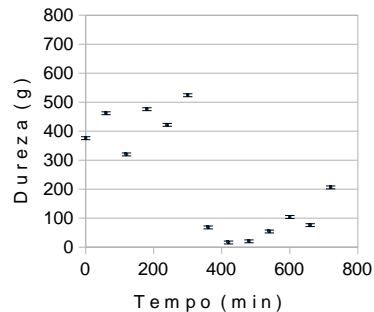
8 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)



9 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)



10 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)



11 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)

Na Tabela 4 é apresentada a dureza final das fatias de yacon desidratadas.

TABELA 4: DUREZA FINAL DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS A VÁCUO.

Amostra	Dureza (g)
1 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	188,0000 $\pm$ 4,6633
2 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	332,0000 $\pm$ 4,6633
3 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	522,0000 $\pm$ 4,6633
4 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	166,0000 $\pm$ 4,6633
5 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	256,0000 $\pm$ 4,6633
6 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	786,0000 $\pm$ 4,6633
7 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	512,0000 $\pm$ 4,6633
8 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	532,0000 $\pm$ 4,6633
9 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	224,0000 $\pm$ 4,6633
10 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	216,0000 $\pm$ 4,6633
11 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	206,0000 $\pm$ 4,6633

Observou-se, na maioria dos casos, que quanto maior a temperatura utilizada, mantendo a concentração de ácido cítrico e a espessura fixas, maior a dureza observada no produto final, corroborando com os resultados de THOMKAPANICH, SUVARNAKUTA e DEVAHASTIN (2007). Segundo TRONCOSO e PEDRESCHI (2007), quanto mais alta a temperatura, maiores os valores de dureza, uma vez que altas taxas de secagem levam a texturas mais rígidas e crocantes.

#### 4.3 CINÉTICA DE SECAGEM

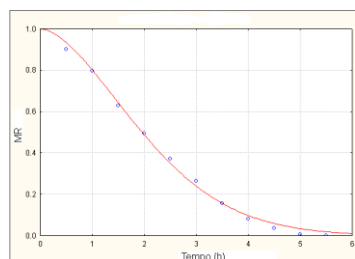
Na Tabela 5 são apresentados os valores dos parâmetros dos modelos cinéticos, juntamente com seu erro de predição e o respectivo coeficiente de determinação. Comparando o modelo de Henderson-Pabis com o modelo de Newton, observou-se que o maior valor de  $R^2$  foi obtido para o modelo de Henderson-Pabis, corroborando com os resultados de AMELLAL e BENAMARA (2008). Este resultado deve-se provavelmente ao maior número de parâmetros do modelo de Henderson-Pabis. Comparando os quatro modelos utilizados, o maior valor de  $R^2$  foi obtido para o modelo de Page modificado, assim como o menor erro médio dos parâmetros, o que levou a indicação deste modelo como o mais adequado para representar a cinética de secagem do yacon. VEGA-GÁLVEZ et al. (2008) encontraram resultados semelhantes para a secagem de fatias de maçã por ar quente.

TABELA 5: PARÂMETROS DOS MODELOS UTILIZADOS PARA AJUSTAR A CINÉTICA DE SECAGEM DO YACON.

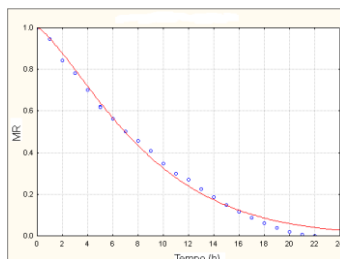
Modelo														
Exper.	Newton		Henderson-Pabis				Page			Page modificado				
	K	Erro	A	Erro	K	Erro	k	Erro	n	Erro	K	Erro	n	Erro
1	0,432	0,022	1,113	0,037	0,477	0,026	0,222	0,007	1,695	0,034	0,412	0,003	1,695	0,034
2	0,113	0,002	1,080	0,017	0,122	0,003	0,052	0,003	1,332	0,023	0,109	0,001	1,332	0,023
3	0,335	0,010	1,069	0,023	0,357	0,013	0,212	0,010	1,368	0,038	0,321	0,004	1,368	0,038
4	0,109	0,003	1,103	0,021	0,119	0,003	0,037	0,002	1,459	0,024	0,105	0,001	1,459	0,024
5	0,702	0,032	1,051	0,031	0,735	0,038	0,569	0,018	1,411	0,050	0,671	0,011	1,411	0,050
6	0,194	0,007	1,093	0,026	0,211	0,008	0,082	0,003	1,486	0,024	0,186	0,001	1,486	0,024
7	0,600	0,021	1,064	0,025	0,635	0,025	0,457	0,009	1,390	0,026	0,570	0,005	1,390	0,026
8	0,195	0,007	1,078	0,025	0,209	0,008	0,068	0,008	1,433	0,064	0,187	0,002	1,433	0,031
9	0,185	0,006	1,082	0,025	0,200	0,007	0,083	0,005	1,439	0,030	0,178	0,002	1,439	0,030
10	0,183	0,007	1,097	0,028	0,200	0,008	0,071	0,004	1,524	0,031	0,175	0,001	1,524	0,031
11	0,209	0,007	1,065	0,025	0,222	0,009	0,109	0,007	1,376	0,038	0,200	0,003	1,376	0,038
Erro médio	3,554%		2,383%		3,918%		5,315%		2,381%		1,009%		2,203%	
R <sup>2</sup>	0,961		0,969				0,995				0,995			

No Gráfico 5 é apresentada a cinética de secagem ajustada pelo modelo de Page modificado para as amostras processadas nos experimentos 1 a 11.

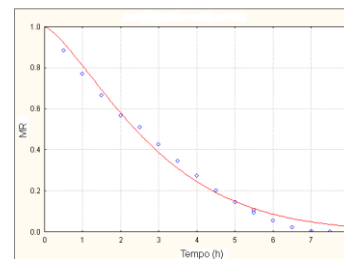
**GRÁFICO 5: CINÉTICA DE SECAGEM AJUSTADA PELO MODELO DE PAGE MODIFICADO PARA O YACON DESIDRATADO NOS EXPERIMENTOS 1 A 11.**



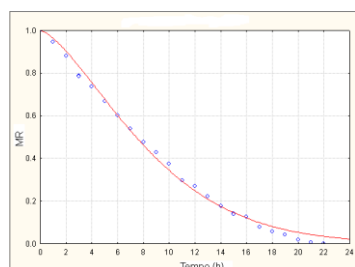
1 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)



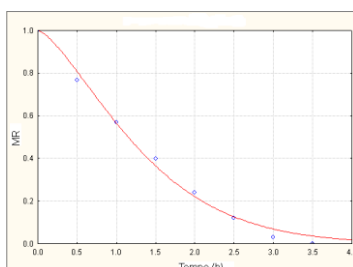
2 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)



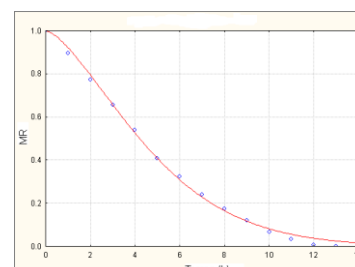
3 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)



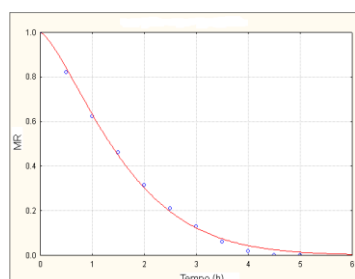
4 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)



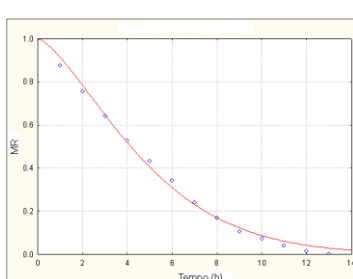
5 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)



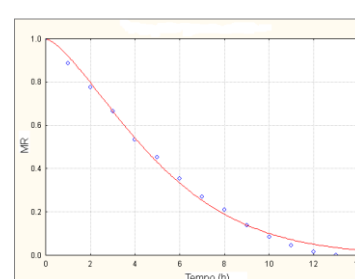
6 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)



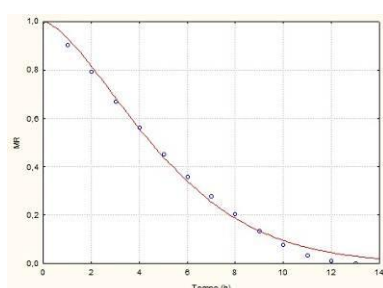
7 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)



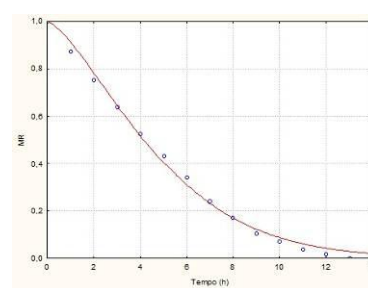
8 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)



9 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)



10 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)

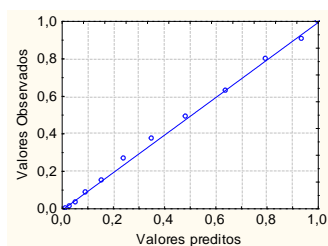


11 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)

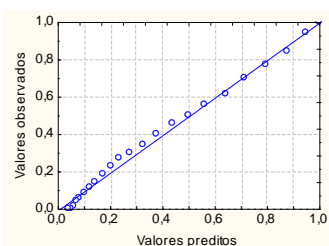
O ajuste apresentado no Gráfico 5 é adequado, uma vez que a curva que representa o modelo de Page modificado coincide bem com os pontos experimentais.

No Gráfico 6 são apresentados os valores observados e os valores preditos pelo modelo de Page modificado para a cinética de secagem dos experimentos 1 a 11.

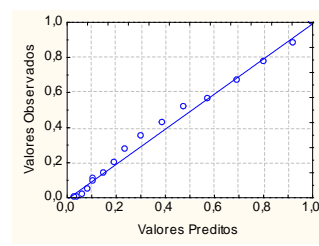
**GRÁFICO 6: VALORES OBSERVADOS VS VALORES PREDITOS PELO MODELO DE PAGE MODIFICADO PARA A CINÉTICA DE SECAGEM DOS EXPERIMENTOS 1 A 11.**



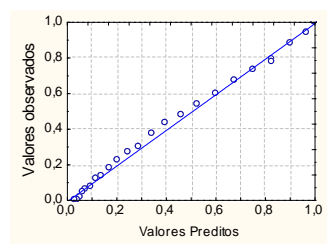
1 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)



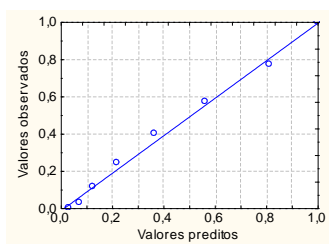
2 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)



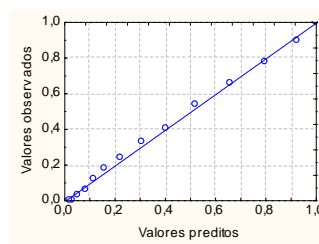
3 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)



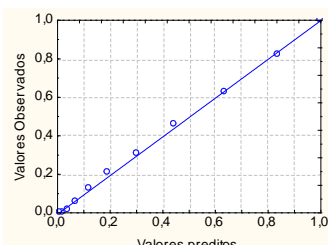
4 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)



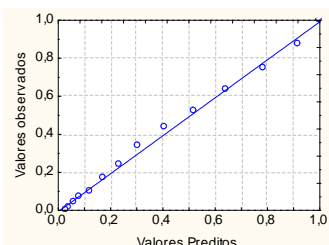
5 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)



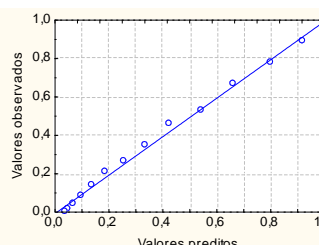
6 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)



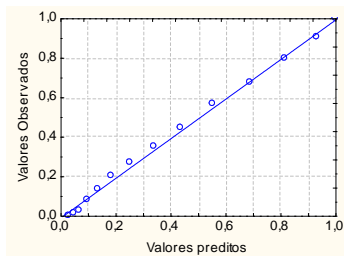
7 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)



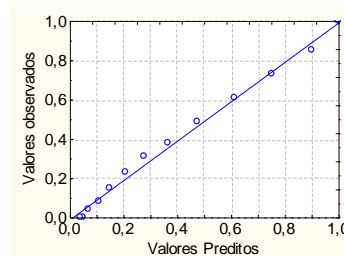
8 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)



9 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)



10 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)



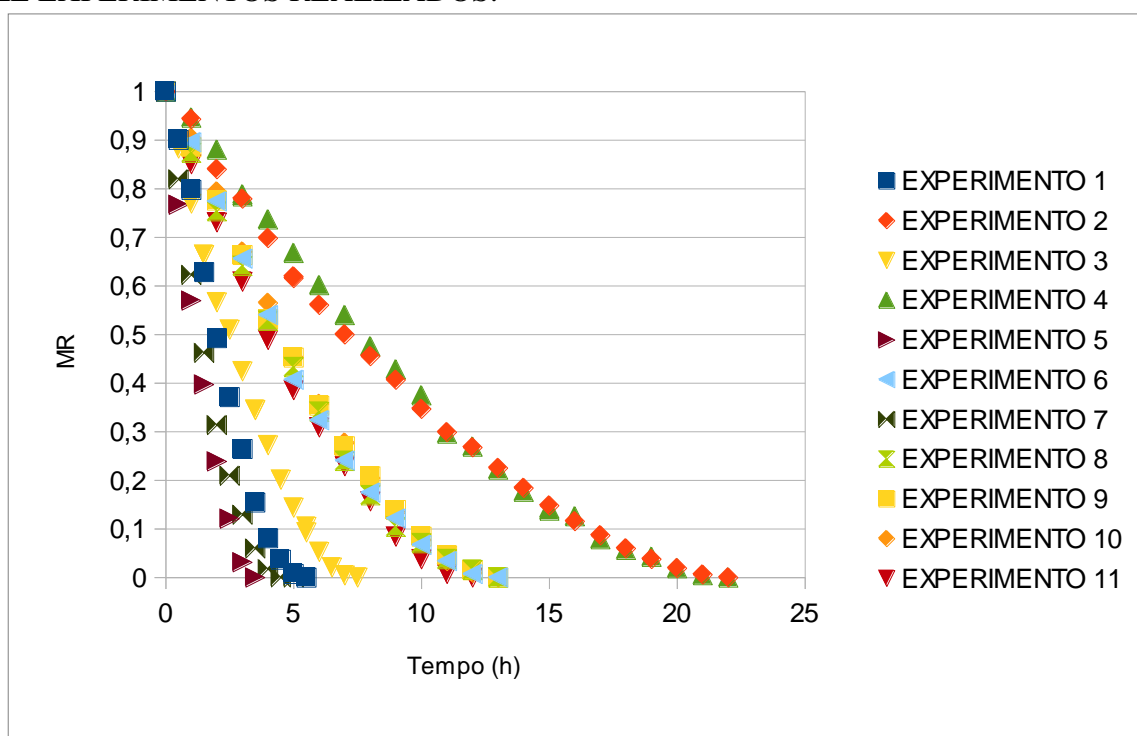
11 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)



Pode-se observar no Gráfico 6 que a linha de ajuste apresenta uma inclinação de praticamente 45°, o que denota o excelente ajuste do modelo de Page modificado aos dados experimentais.

No Gráfico 7 é apresentada a variação da razão entre umidades com o tempo para os onze experimentos realizados.

**GRÁFICO 7: VARIAÇÃO DA RAZÃO ENTRE UMIDADES COM O TEMPO PARA OS ONZE EXPERIMENTOS REALIZADOS.**



Observou-se que as amostras de 0,2 cm de espessura (experimentos 1, 3, 5 e 7) foram desidratadas com as maiores taxas de secagem, sendo que aquelas onde se utilizou a temperatura de 65 °C (experimentos 5 e 7) as mais altas taxas de secagem dentre todas. Outro grupo de curvas esteve associado a taxas intermediárias de secagem (experimentos 6, 8, 9 10 e 11), onde foram combinadas altas espessuras (0,6 cm) com altas temperaturas (65 °C) ou espessuras intermediárias (0,4 cm) com temperaturas intermediárias (55 °C). Um terceiro grupo de curvas esteve associado a taxas de secagem baixas, e representa os experimentos 2 e 4, onde se utilizou altas espessuras (0,6 cm) e baixas temperaturas (45 °C).

#### 4.4 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM SOBRE AS RESPOSTAS

As condições variáveis de secagem, ou seja, os fatores do delineamento experimental proposto foram a espessura das fatias de yacon (em cm), a concentração de ácido cítrico na solução de pré-tratamento de inibição enzimática (em g/100 g de solução) e a temperatura de secagem (em °C). Utilizando o programa Statistica® versão 7.0, foi estudado o efeito de diferentes condições de secagem sobre as seguintes propriedades do produto: dureza final (em g), luminosidade final, tonalidade verde-vermelha final, tonalidade azul-amarela final, ângulo de tom final, saturação final, umidade final, atividade de água final, dureza média (em g), luminosidade média, tonalidade verde-vermelha média, tonalidade azul-amarela média, umidade média, dimensão fractal, razão de reidratação, diferença total de cor, ângulo de tom médio e saturação média. As análises de influência das variáveis foram feitas utilizando a metodologia ANOVA. Nas tabelas a seguir, optou-se por apresentar os resultados dos efeitos lineares individuais independentemente de sua significância estatística. Em relação aos efeitos de interação, estes só serão apresentados quando possuírem significância estatística, a qual foi considerada como sendo 95%. Na Tabela 6 é apresentada a análise de variância para o efeito dos fatores sobre a luminosidade final das fatias de yacon.

**TABELA 6: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A LUMINOSIDADE FINAL DO PRODUTO.**

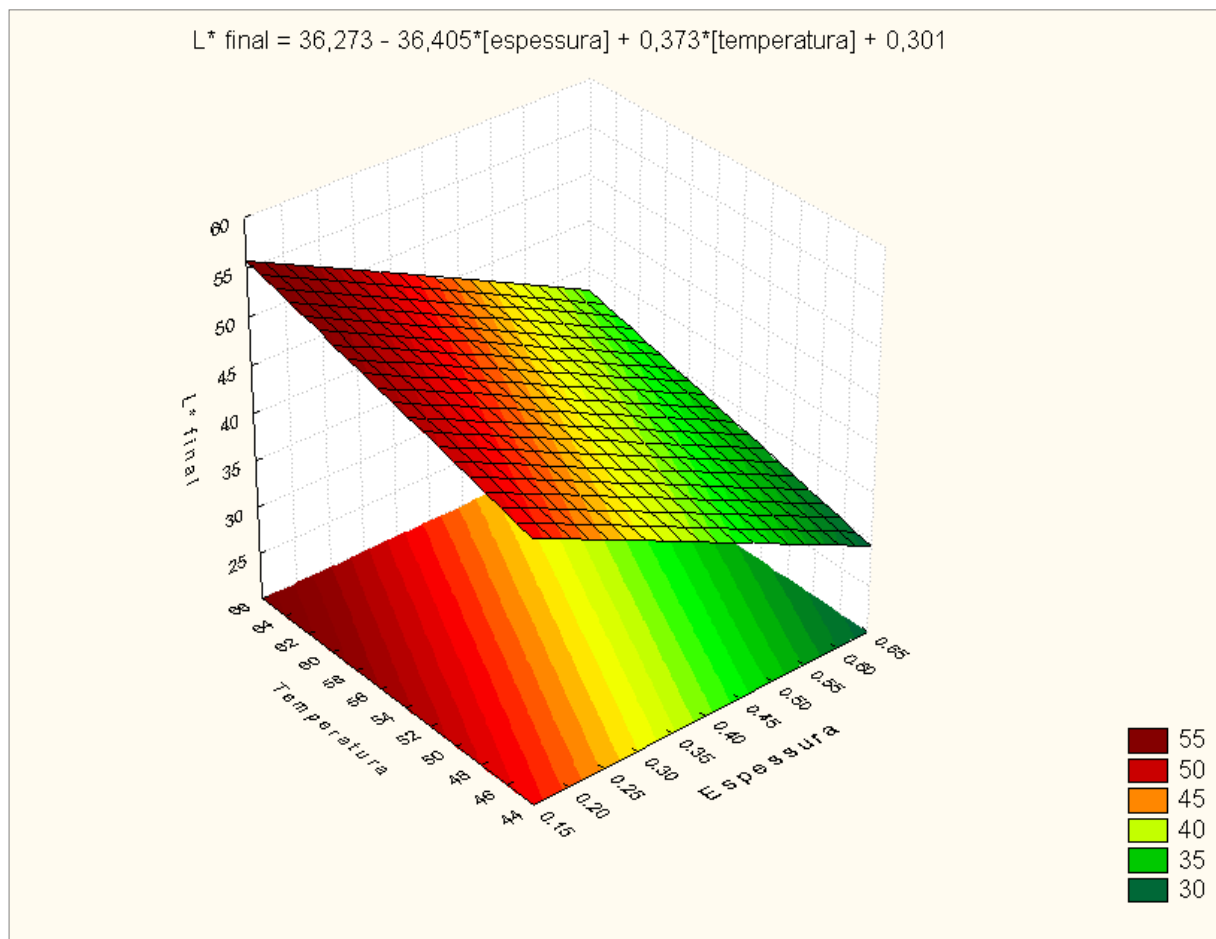
Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Valor p
Espessura	424,0950	1	424,0950	381,8626	0,00261*
Concentração de ácido	0,3234	1	0,3234	0,2912	0,64351
Temperatura	111,0736	1	111,0736	100,0126	0,00985*
Falta de ajuste	42,7730	5	8,5546	7,7027	0,11888
Erro puro	2,2212	2	1,1106		
Soma de quadrados total	580,4861	10			

\* Significativo ao nível de 5 %.

Observou-se que os maiores efeitos foram da espessura e da temperatura sobre a luminosidade final. Por este motivo, o efeito destes dois fatores sobre a luminosidade final do

yacon foi expresso em um gráfico de superfície de resposta e a concentração de ácido foi mantida no ponto central do delineamento, ou seja, 0,6 g/100 g (Gráfico 8).

**GRÁFICO 8: INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS FATIAS E DA TEMPERATURA DE SECAGEM SOBRE A LUMINOSIDADE DO PRODUTO FINAL.**



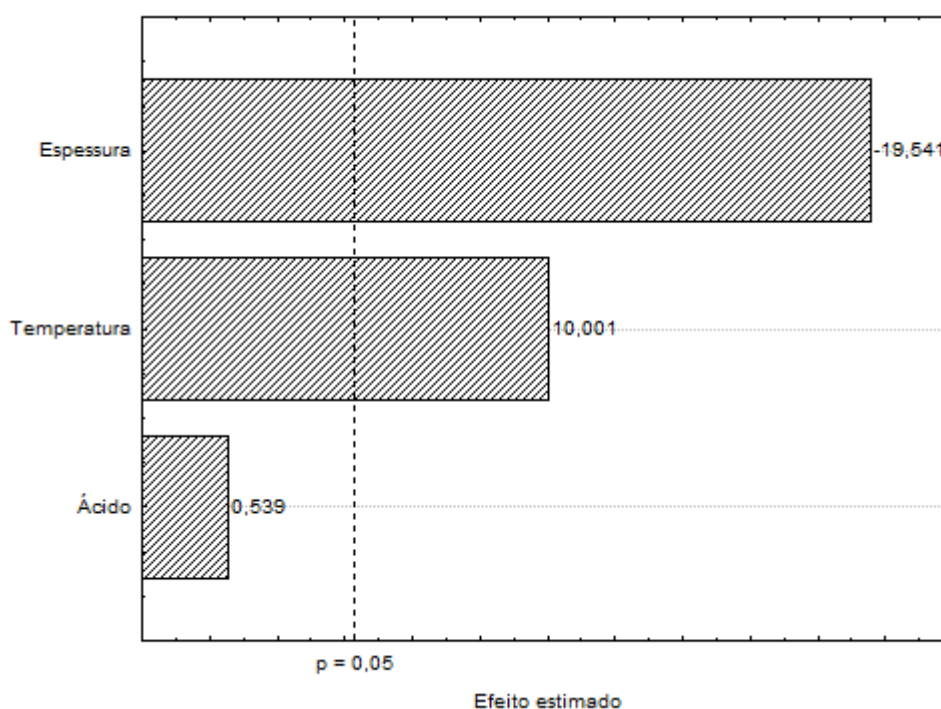
OLIVEIRA et al. (2009) observou resultados similares durante a secagem de microalgas, onde o uso de temperaturas mais altas e camadas menores de produto resultaram em menor alteração da cor do produto.

Em uma operação de secagem, o ideal é que a amostra escureça o menos possível, ou seja, que apresente a maior luminosidade ( $L^*$ ) final. No Gráfico 8, esta condição está representada pela cor vermelho-escura. Ou seja, segundo o modelo matemático polinomial descrito no Gráfico 8, para obter fatias de yacon mais claras e desejáveis deve utilizar temperaturas que variem entre 50 °C e 66 °C e fatias de 0,15 cm a 0,30 cm de espessura.

No gráfico 9 é apresentada a carta de Pareto (teste de estimativa de efeitos), apontando

que o efeito da espessura sobre a luminosidade final das fatias de yacon é negativo, ou seja, quanto maior a espessura das fatias, menor a luminosidade observada no produto final. A partir do gráfico 9 pode-se concluir também que o efeito da temperatura de secagem sobre a luminosidade final é positivo, ou seja, quanto maior a temperatura de secagem, maior a luminosidade do produto final.

GRÁFICO 9: EFEITO DOS FATORES SOBRE A LUMINOSIDADE FINAL DAS AMOSTRAS.



Na Tabela 7 é apresentada a análise de variância para o efeito dos fatores sobre a tonalidade azul-amarela média das fatias de yacon ao longo da secagem. Observou-se que os maiores efeitos foram da concentração de ácido e da temperatura sobre a tonalidade azul-amarela média das fatias. Por este motivo, o efeito destes dois fatores sobre a tonalidade azul-amarela final do yacon foi expresso em um gráfico de superfície de resposta e a espessura foi mantida no ponto central do delineamento, ou seja, 0,4 cm (Gráfico 10).

TABELA 7: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A TONALIDADE AZUL-AMARELA MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.

Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Valor p
Espessura	0,68305	1	0,68305	5,1095	0,15225
Concentração de ácido	21,82084	1	21,82084	163,2269	0,00607*
Temperatura	13,70798	1	13,70798	102,5401	0,00961*
Interação espessura-temperatura	10,41585	1	10,41585	77,9139	0,01259*
Falta de ajuste	1,96774	4	0,49193	3,6798	0,22493
Erro puro	0,26737	2	0,13368		
Soma de quadrados total	48,86283	10			

\* Significativo ao nível de 5 %.

A cor amarela dourada é apelativa em vegetais de polpa clara desidratados, como batatas fritas (GOLUBOWSKA, 2005), por exemplo, sendo que quanto mais alta a tonalidade azul-amarela, melhor é considerada a cor do produto final. Segundo o modelo matemático que consta no Gráfico 10, a maior tonalidade azul-amarela das fatias é obtida quando se combinam temperaturas entre 56 °C e 65 °C com concentrações de ácido entre 0,7 g/100 g solução e 1,0 g/100 g solução.

No gráfico 11 é apresentada a carta de Pareto (teste de estimativa de efeitos), apontando que o efeito da concentração de ácido sobre a tonalidade azul-amarela média das fatias de yacon é positivo, ou seja, quanto maior a concentração de ácido, maior a tonalidade azul-amarela média das fatias de yacon. A partir do gráfico 11 pode-se concluir também que o efeito da temperatura de secagem sobre a tonalidade azul-amarela média é positivo, ou seja, quanto maior a temperatura de secagem, maior a tonalidade azul-amarela média das fatias de yacon.

GRÁFICO 10: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO E DA TEMPERATURA DE SECAGEM SOBRE A TONALIDADE AZUL-AMARELA MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.

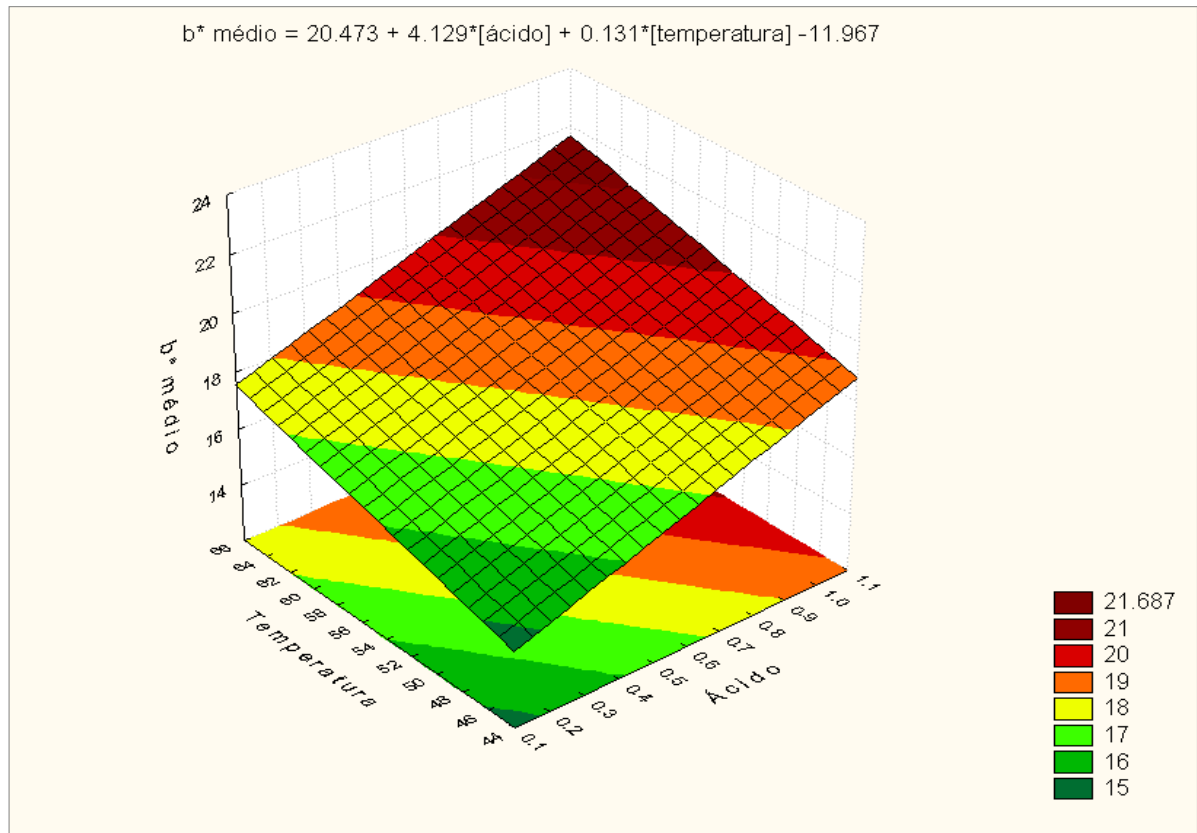
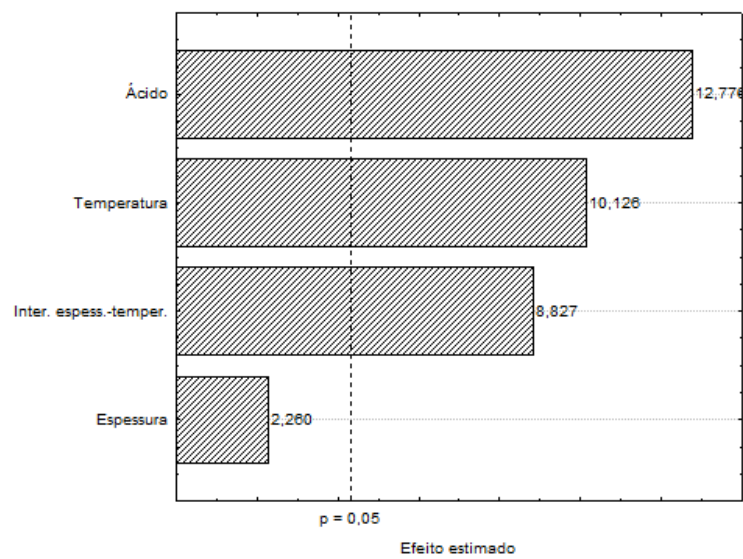


GRÁFICO 11: EFEITO DOS FATORES SOBRE A TONALIDADE AZUL-AMARELA MÉDIA DAS AMOSTRAS.



O efeito positivo da concentração de ácido sobre a tonalidade azul-amarela das fatias de yacon poderia ser explicado pela hidrólise ácida da inulina presente, gerando rapidamente açúcares redutores como frutose e glicose (CARIOCA et al., 1988) e alimentando dessa maneira a reação de Maillard, que gera compostos amarelos a marrons. O mesmo pode ser afirmado sobre a temperatura, que exerceu um efeito positivo sobre a tonalidade azul-amarela, pois acelerou a reação de Maillard.

Na Tabela 8 é apresentada a análise de variância para o efeito dos fatores sobre a saturação média das fatias de yacon ao longo da secagem.

**TABELA 8: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A SATURAÇÃO MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.**

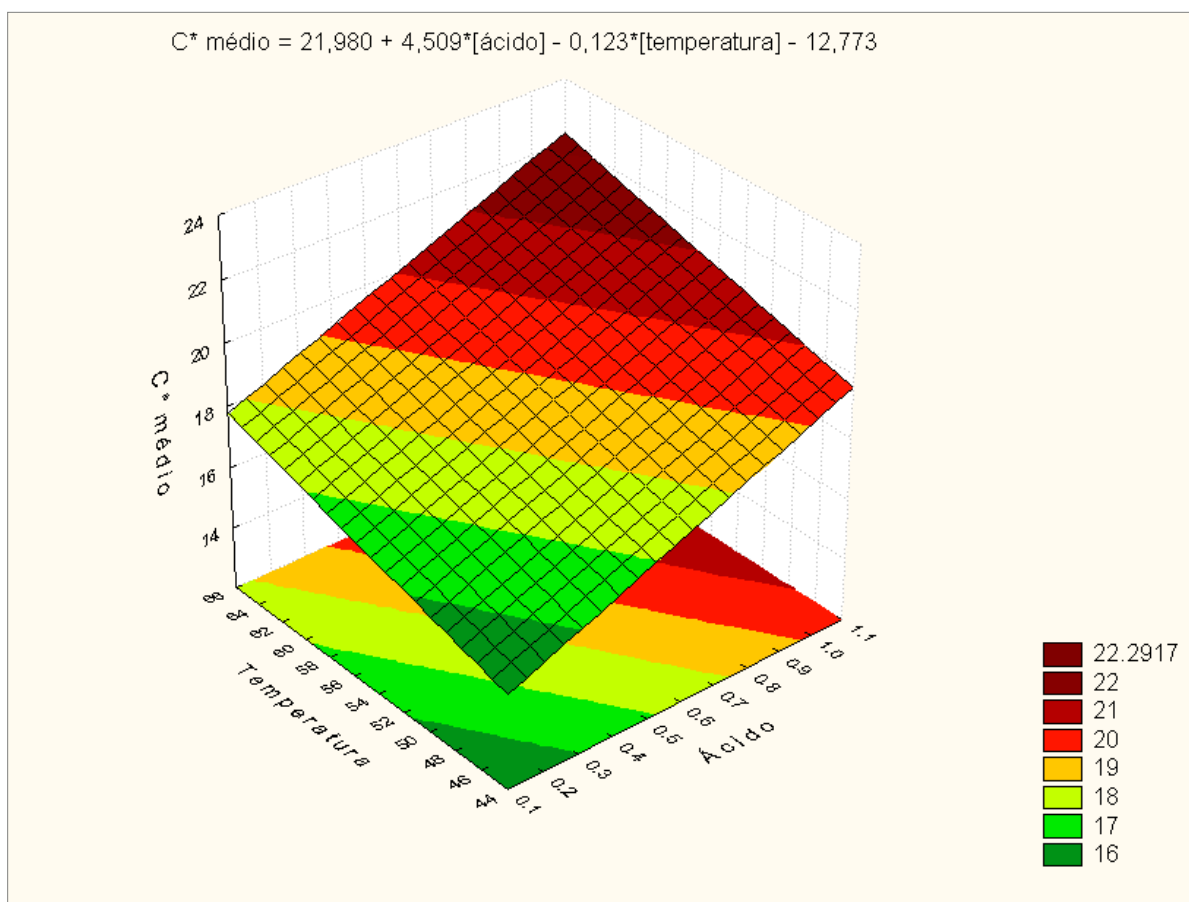
Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Valor p
Espessura	1,84108	1	1,84108	10,5080	0,08343
Concentração de ácido	26,02216	1	26,02216	139,8088	0,00667*
Temperatura	12,12459	1	12,12459	65,1415	0,01415*
Interação espessura-temperatura	12,46825	1	12,46825	71,1626	0,01376*
Falta de ajuste	2,15908	4	0,53977	3,0807	0,25977
Erro puro	0,35042	2	0,17521		
Soma de quadrados total	54,96557	10			

\* Significativo ao nível de 5 %.

Observou-se que os maiores efeitos foram da concentração de ácido e da temperatura sobre a saturação média. Por este motivo, o efeito destes dois fatores sobre a saturação média do yacon foi expresso em um gráfico de superfície de resposta, onde a espessura foi mantida no ponto central do delineamento, ou seja, 0,4 cm (Gráfico 12).

A saturação média ( $C^*$  médio) dá uma dimensão da mistura da cor da amostra com o cinza, e na prática mostra quão intensa ou “viva” é a cor da amostra. Em alimentos, é interessante que a cor do produto seja intensa, pois é mais apelativa do que cores “apagadas”. Por este motivo empregam-se os corantes alimentícios.

GRÁFICO 12: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO E DA TEMPERATURA DE SECAGEM SOBRE A SATURAÇÃO MÉDIA DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.

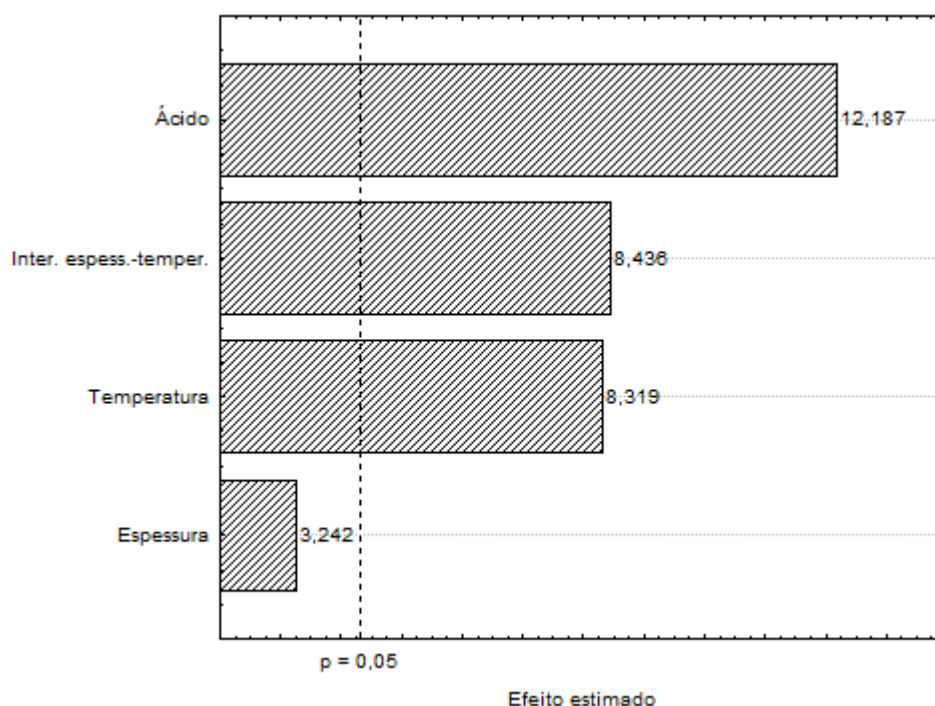


Segundo o modelo matemático que consta no Gráfico 12, a maior saturação das fatias é obtida quando se combinam temperaturas entre 58 e 65 °C com concentrações de ácido entre 0,8 g/100 g solução e 1,0 g/100 g solução.

No gráfico 13 é apresentada a carta de Pareto (teste de estimativa de efeitos), apontando que o efeito da concentração de ácido sobre a saturação média das fatias de yacon é positivo, ou seja, quanto maior a concentração de ácido, maior a saturação média das fatias de yacon. A partir do gráfico 13 pode-se concluir também que o efeito da temperatura de secagem sobre a saturação média é positivo, ou seja, quanto maior a temperatura de secagem, maior a saturação média das fatias de yacon.



GRÁFICO 13: EFEITO DOS FATORES SOBRE A SATURAÇÃO MÉDIA DAS AMOSTRAS.



A explicação do efeito positivo da concentração de ácido cítrico e da temperatura sobre a saturação média do produto ao longo da secagem é a mesma da descrita para a tonalidade azul-amarela média ( $b^*$  médio), ou seja, estes fatores estimulam a reação de Maillard, que é responsável pela geração de compostos coloridos. Para fatias de banana, THOMKAPANICH, SUVARNAKUTA e DEVAHASTIN (2007) observaram que temperaturas mais altas causaram maior alteração de cor do produto, conforme foi observado no presente estudo.

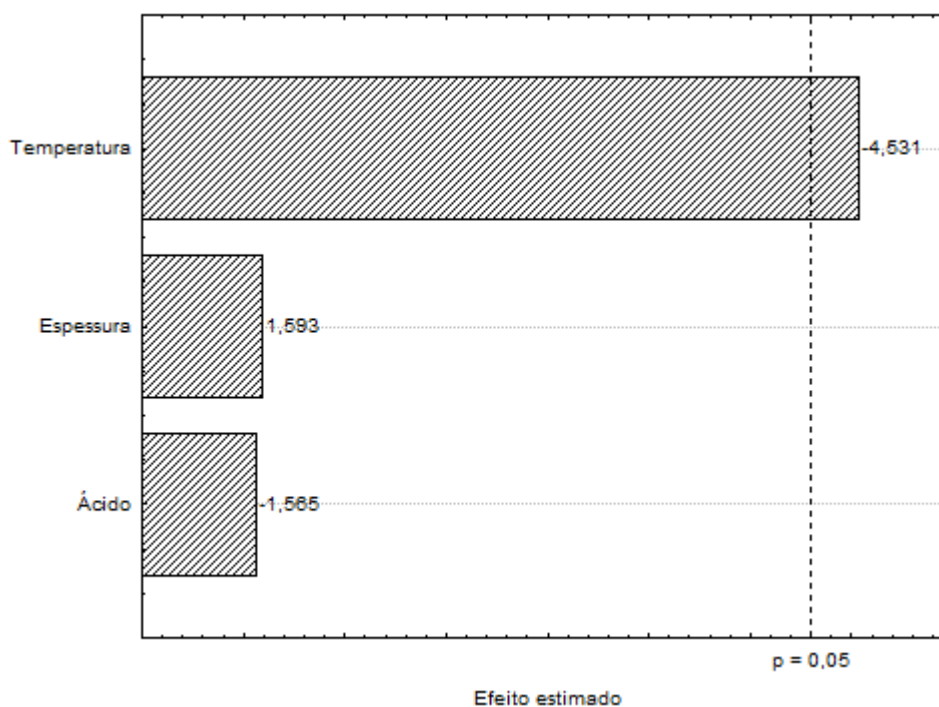
Na Tabela 9 é apresentada a análise de variância para o efeito dos fatores sobre a dimensão fractal das fatias de yacon ao longo da secagem. Observou-se que o efeito do fator temperatura apresentou-se significativo ao nível de 5%. O teste de estimativa de efeitos (Gráfico 14) aponta que o efeito da temperatura é negativo, ou seja, quanto maior a temperatura de secagem, menor a dimensão fractal observada no produto final.

TABELA 9: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A DIMENSÃO FRACTAL DO PRODUTO AO LONGO DA SECAGEM.

Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Valor p
Espessura	0,002734	1	0,002734	2,53744	0,25219
Concentração de ácido	0,002639	1	0,002639	2,44901	0,25807
Temperatura	0,022124	1	0,022124	20,53072	0,04541*
Falta de ajuste	0,020489	5	0,004098	3,80275	0,22123
Erro puro	0,002155	2	0,001078		
Soma de quadrados total	0,050141	10			

\* Significativo ao nível de 5 %.

GRÁFICO 14: EFEITO DOS FATORES SOBRE A DIMENSÃO FRACTAL DAS AMOSTRAS.



Este efeito pode ser explicado pelo fato de que os experimentos conduzidos sob alta temperatura resultaram em menor escurecimento enzimático, que está positivamente correlacionado à dimensão fractal em vegetais de polpa clara (QUEVEDO et al., 2009a, QUEVEDO et al., 2009b, QUEVEDO et al., 2009c). Ou seja, o uso de altas temperaturas (65 °C) resultou em baixos valores de dimensão fractal e baixo escurecimento, enquanto o uso de

baixas temperaturas (45 °C) resultou em altos valores de dimensão fractal e alto escurecimento. A temperatura de 45 °C, apesar de estar acima da temperatura ótima (30 °C) para a atividade da enzima polifenoloxidase do yacon (NEVES e SILVA, 2007), é adequada para promover a catálise da conversão de fenóis a quinonas (marrons). A geração de quinonas é a responsável pelo escurecimento enzimático, que torna a aparência da polpa clara de vegetais indesejável (MARSHALL, KIM e WEI, 2000).

Na Tabela 10 é apresentada a análise de variância para o efeito dos fatores sobre a razão de reidratação das fatias de yacon ao longo da secagem.

**TABELA 10: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA AJUSTAR O EFEITO DOS FATORES SOBRE A RAZÃO DE REIDRATAÇÃO DO PRODUTO.**

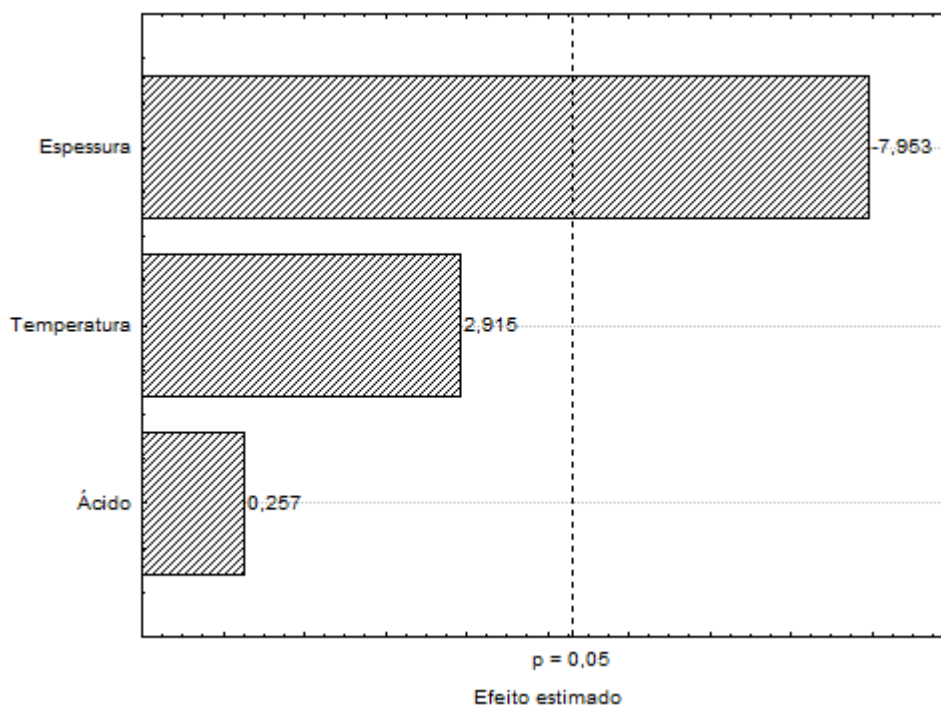
Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Valor F	Valor p
Espessura	1,826299	1	1,826299	63,24750	0,01545*
Concentração de ácido	0,001912	1	0,001912	0,06621	0,82099
Temperatura	0,245390	1	0,245390	8,49822	0,10028
Falta de ajuste	1,050867	5	0,210173	7,27862	0,12519
Erro puro	0,057751	2	0,028875		
Soma de quadrados total	3,182218	10			

\* Significativo ao nível de 5 %.

O único fator que apresentou efeito significativo sobre a razão de reidratação foi a espessura das fatias. O efeito observado foi do tipo negativo (Gráfico 15). Assim sendo, quanto menor a espessura, maior a reidratação das amostras.

Este resultado deve-se provavelmente à dificuldade da água de reidratação de locomover-se até as células internas das fatias mais espessas. KERDPIBOON, DEVAHASTIN e KERR (2007) observaram um efeito positivo da temperatura de secagem sobre a taxa de reidratação. Esta tendência, embora não tenha se apresentado significativa ao nível de 95% de confiança segundo a análise de variância, também foi observada no presente estudo.

GRÁFICO 15: EFEITO DOS FATORES SOBRE A RAZÃO DE REIDRATAÇÃO DAS AMOSTRAS.



#### 4.5 DIMENSÃO FRACTAL E RAZÃO DE REIDRATAÇÃO

Na Tabela 11 são apresentados os valores de dimensão fractal das amostras ao final da secagem. Observou-se que a dimensão fractal das amostras ficou entre 1 e 2, ou seja, as imagens apresentam uma dimensão intermediária entre a dimensão de uma reta ( $DF = 1$ ) e de um plano ( $DF = 2$ ), confirmando que são fractais. O menor valor de dimensão fractal foi observado para a amostra processada no experimento 5, que foi desidratada à temperatura de 65 °C, com espessura de 0,2 cm e pré-tratada com ácido cítrico sob a concentração de 0,2 g ácido/ 100 g de solução. Por outro lado, a amostra que apresentou o maior valor de dimensão fractal foi a amostra processada no experimento 2, que foi desidratada à temperatura de 45 °C, com espessura de 0,6 cm e pré-tratada com ácido cítrico sob a concentração de 0,2 g ácido/ 100 g de solução. Este resultado confirma um efeito negativo da temperatura de secagem sobre a dimensão fractal das fatias de yacon desidratadas a vácuo, apresentado no item anterior, ou seja, quanto maior a temperatura de secagem utilizada, menor a dimensão fractal das fatias de yacon desidratadas.

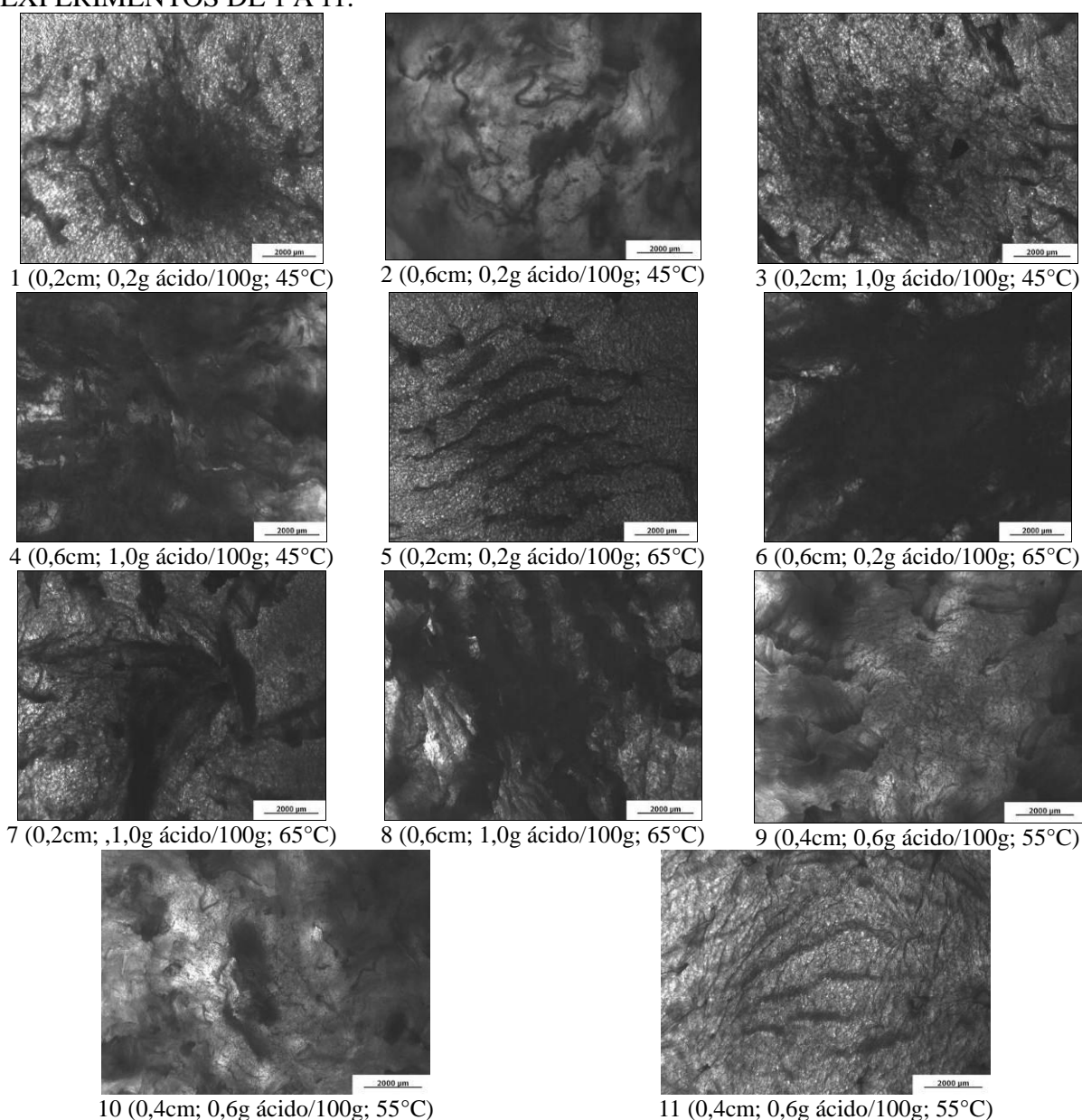
TABELA 11: DIMENSÃO FRACTAL DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS.

Amostra	Dimensão fractal (DF)
1 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	1,7580 $\pm$ 0,0189
2 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	1,8358 $\pm$ 0,0189
3 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	1,6891 $\pm$ 0,0189
4 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	1,6871 $\pm$ 0,0189
5 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	1,5904 $\pm$ 0,0189
6 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	1,6481 $\pm$ 0,0189
7 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	1,6482 $\pm$ 0,0189
8 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	1,6626 $\pm$ 0,0189
9 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	1,7395 $\pm$ 0,0189
10 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	1,7870 $\pm$ 0,0189
11 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	1,7240 $\pm$ 0,0189

Na figura 4 são apresentadas as micrografias tiradas das amostras de yacon desidratado a vácuo sob as condições dos experimentos 1 a 11.

Observa-se que as texturas das imagens são irregulares e heterogêneas, o que explica o fato de apresentarem uma dimensão fractal fracionária. As amostras de baixas espessuras, como é o caso das amostras processadas nos experimentos 1, 3, 5 e 7 permitiram uma maior passagem de luz quando comparadas às amostras de altas espessuras (experimentos 2, 4, 6 e 8). A amostra processada no experimento 9 permitiu uma passagem intermediária de luz, uma vez que sua espessura apresenta tamanho intermediário. Observou-se ainda que as amostras tratadas sob concentrações maiores de ácido cítrico escureceram menos do que aquelas tratadas sob concentrações mais baixas. Isto se deve ao menor escurecimento enzimático sob maiores concentrações de ácido, conforme também observaram REIS, MASSON e WASZCZYNSKYJ (2008) durante o branqueamento de batatas em soluções ácidas. O pH influencia o desempenho de uma enzima na sua função de catalisadora de reações bioquímicas. Por este motivo é comum antes da aplicação de um tratamento sobre vegetais de polpa clara o uso de um pré-tratamento de acidificação, o qual diminui o pH a níveis em que a enzima polifenoloxidase tem sua atividade retardada. Dessa forma a conversão de fenóis a quinonas, compostos marrons, tem sua velocidade retardada, preservando a cor original dos vegetais de polpa clara (MARSHALL, KIM E WEI, 2000).

FIGURA 4: MICROGRAFIAS DAS FATIAS DE YACON PROCESSADAS NOS EXPERIMENTOS DE 1 A 11.



Na Tabela 12 é apresentada a razão de reidratação das fatias de yacon desidratadas. As maiores razões de reidratação foram observadas para as fatias menos espessas, o que confirma um efeito negativo da espessura sobre a razão de reidratação reportado no item anterior.

TABELA 12: RAZÃO DE REIDRATAÇÃO DAS FATIAS DE YACON DESIDRATADAS.

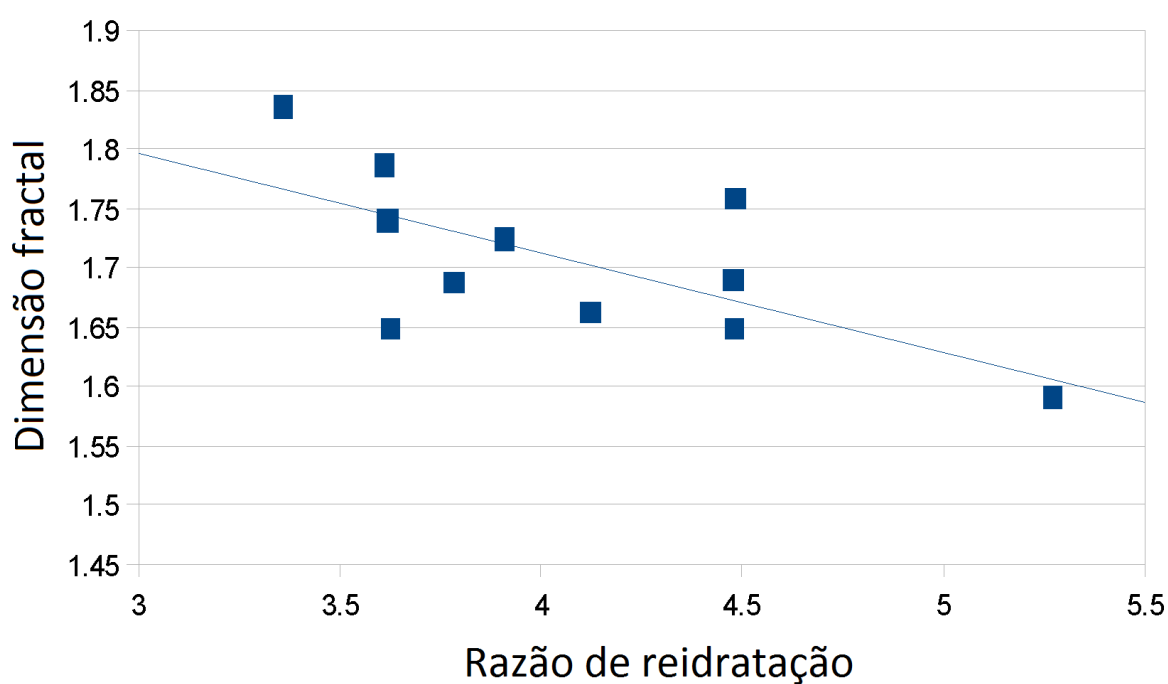
Amostra	Razão de reidratação
1 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	4,4818 $\pm$ 0,0981
2 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 45°C)	3,3594 $\pm$ 0,0981
3 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	4,4782 $\pm$ 0,0981
4 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 45°C)	3,7835 $\pm$ 0,0981
5 (0,2cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	5,2739 $\pm$ 0,0981
6 (0,6cm; 0,2g ácido/100g; 65°C)	3,6266 $\pm$ 0,0981
7 (0,2cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	4,4808 $\pm$ 0,0981
8 (0,6cm; 1,0g ácido/100g; 65°C)	4,1228 $\pm$ 0,0981
9 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	3,6174 $\pm$ 0,0981
10 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	3,6111 $\pm$ 0,0981
11 (0,4cm; 0,6g ácido/100g; 55°C)	3,9085 $\pm$ 0,0981

#### 4.6 CORRELAÇÃO ENTRE DIMENSÃO FRACTAL E OUTRAS PROPRIEDADES

As variáveis dependentes do delineamento experimental representam propriedades de cor, textura, teor de água, dimensão fractal e razão de reidratação do yacon desidratado ao longo e ao final da operação de secagem. A medida da dimensão fractal pode ser feita de maneira rápida, confiável e pouco onerosa. Portanto, este item é dedicado a buscar correlações entre dimensão fractal e outras propriedades do produto, visando substituir a medição de propriedades de difícil medida pela medição de propriedades de fácil medida ou menos onerosas, como a dimensão fractal. Algumas propriedades apresentaram correlação significativa com a dimensão fractal, como o ângulo de tom do produto final ( $r=-0,62$ ), a umidade do produto final ( $r = 0,79$ ), e a razão de reidratação do produto final ( $r = -0,67$ ). Dessa forma, estas medidas poderiam ser complementadas por uma análise de imagem. Futuramente, com o aperfeiçoamento das condições de análise de imagem, poderia ser factível a substituição destas medidas por uma análise de imagem. Tais resultados são similares àqueles observados por outros autores quando investigaram a correlação entre dimensão fractal e reidratação de batatas desidratadas (KERDPIBOON, DEVAHASTIN e KERR, 2007) e cenouras desidratadas (KERDPIBOON e DEVAHASTIN, 2007). No Gráfico 16 é apresentada a relação entre dimensão fractal e razão de reidratação. Observa-se que a dimensão fractal diminui com o aumento da razão de reidratação. Este comportamento pode

ser explicado pelo fato de que altas dimensões fractais estão positivamente correlacionadas a alto grau de alteração da estrutura original (KERDPIBOON e DEVAHASTIN, 2007), ao passo que altas razões de reidratação estão positivamente correlacionadas a uma estrutura praticamente inalterada pela secagem, próxima à estrutura original do tecido vegetal (BEAUDRY et al., 2004).

GRÁFICO 16: RELAÇÃO ENTRE DIMENSÃO FRACTAL E RAZÃO DE REIDRATAÇÃO.





## 5 CONCLUSÕES

Observou-se que diferentes condições de secagem levam a diferentes valores dos parâmetros de qualidade do yacon estudados. Mais especificamente, diferentes temperaturas de secagem, espessuras das fatias e concentrações de ácido no pré-tratamento osmótico de inibição do escurecimento enzimático influenciaram em especial a cor das fatias de yacon desidratadas. Altas temperaturas (58 – 65 °C), baixas espessuras ( $\leq 0,4$  cm) e altas concentrações de ácido (0,8 – 1,1 g/100 g) originam um produto final de cor clara, amarelodourada e de alta saturação, que são características de cor desejáveis em vegetais de polpa clara submetidos à desidratação. Em relação à textura, na maioria dos casos, quanto maior a temperatura utilizada, mantendo a concentração de ácido cítrico e a espessura fixas, maior o valor da dureza do produto final. A atividade de água dos produtos originados utilizando-se diferentes condições de secagem apresentou-se sempre abaixo de 0,6, o que garante alta estabilidade durante o armazenamento do produto final. A taxa de reidratação também foi afetada pela variação das condições de processo, de modo que quanto menor a espessura das fatias de yacon, maior sua taxa de reidratação. Para a dimensão fractal, observou-se que quanto maior a temperatura de secagem, menor a dimensão fractal observada no produto final. As mudanças de cor das fatias de yacon ao longo da secagem consistiram, na maioria dos casos, em diminuição da luminosidade, aumento da tonalidade verde-vermelha e aumento da tonalidade azul-amarela. Já as mudanças de textura ao longo da secagem das fatias consistiram, em geral, em inalteração da dureza em instantes iniciais de processo, seguidas de amaciamento em instantes intermediários e endurecimento ao final. A cinética de secagem foi mais bem ajustada pelo modelo de Page modificado, que consiste em um modelo exponencial de três parâmetros. Esta conclusão foi tomada com base nos altos valores de  $R^2$  para o ajuste dos dados e baixos valores de erro médio de predição dos parâmetros do modelo observados. Foram obtidas correlações significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre dimensão fractal e parâmetros tradicionais de qualidade de produtos desidratados, como cor (ângulo de tom), umidade e razão de reidratação. Tais resultados indicam que estas medidas tradicionais podem ser, pelo menos, complementadas por uma análise de imagem, que é um tipo de análise mais rápido, barato e que pode ser utilizado como parâmetro de controle de qualidade em um processo industrial automatizado.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a. Testar as condições que levaram à obtenção de um produto final de cor ideal no laboratório.
- b. Aperfeiçoar as condições de análise de imagem, visando à obtenção de correlações mais altas entre dimensão fractal e outros parâmetros de qualidade.
- c. Estudar a influência de diferentes condições de vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de yacon.
- d. Utilizar outra geometria do yacon a ser desidratado, como a cúbica, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

AMELLAL, H., BENAMARA, S. Vacuum drying of common date pulp cubes. **Drying Technology**, v. 26, p. 378-382, 2008.

ASHPAMAMA. “YACON” a batata dos diabéticos, 2011. Disponível em <http://ashpamama-ashpamama.blogspot.com/2011/05/yacon-batata-dos-diabeticos.html>. Acesso em Out./2011.

BEAUDRY, C., RAGHAVAN, G. S. V., RATTI, C., RENNIE, T. J. Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. **Drying Technology**, v. 22, n. 3, p. 521-539, 2004.

BOLLA, G. O que é Yacon?, 2009. Disponível em <http://www.blogsocialdudupacheco.com/dudupacheco.cfm?id=10129&n1>. Acesso em Out./2011.

BUNGER, A.; MOYANO, P.C.; VEJA, R.E.; GUERRERO, P.; OSÓRIO, F. Osmotic dehydration and freezing as combined processes on apple preservation. **Food Science and Technology International**, Thousand Oaks, v. 10, n. 3, p. 163-168, 2004.

CAMPOS-MENDIOLA, R., HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, H., CHANONA-PÉREZ, J. J., ALAMILLA-BELTRÁN, L., JIMÉNEZ-APARICIO, A., FITO, P., GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G. F. Non-isotropic shrinkage and interfaces during convective drying of potato slabs within the frame of the systematic approach to food engineerign systems (SAFES) methodology. **Journal of Food Engineering**, v. 83, p. 285-292, 2007.

CARIOCA, J. O. B., ALMEIDA, F. A. G., ARORA, H. L., SELVAM, P., FIGUEIRÓ, S. D. Extração e hidrólise de inulina a partir da alcachofra de Jerusalém (*Helianthus tuberosus* L.). **Ciência Agronômica**, v. 19, n. 1, p. 61-66, 1988.

CHANONA, P. J. J., ALAMILLA, B. L., FARRERA, R. R. R., QUEVEDO, R., AGUILERA, J. M., GUTIÉRREZ, L. G. F. Description of the convective air drying of a food model by

means of the fractal theory. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 3, p. 207-213, 2003.

CIE. **CIE Publication 15.2**. Viena: Central Bureau of the CIE, 1986.

DEVAHASTIN, S., SUVARNAKUTA, P., SOPONRONNARIT, S., MUJUMDAR, A. S. A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. **Drying Technology**, v. 22, n. 8, p. 1845-1867, 2004.

FAGAN, C. C., DU, C. J., O'DONNELL, C. P., CASTILLO, M., EVERARD, C. D., O'CALLAGHAN, D. J., PAYNE, F. A. Application of image texture analysis for online determination of curd moisture and whey solids in a laboratory-scale stirred cheese vat. **Journal of Food Science**, v. 73, n. 6, p. E250-E258, 2008.

FAO. *Polymnia sonchifolia*, 2007. Disponível em <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropView?id=8852>. Acesso em mai./2010.

FOERST, P., KULOZIK, U. Validation of a novel in situ weighing system during vacuum drying. **Drying Technology**, v. 25, p. 767-773, 2007.

GEYER, M., MANRIQUE, I., DEGEN, L., BEGLINGER, C. Effect of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) on colonic transit time in healthy volunteers. **Digestion**, v. 78, n. 1, p. 30-33, 2008.

GOLUBOWSKA, G. Changes of polysaccharide content and texture of potato during French fries production. **Food Chemistry**, v. 60, p. 847-851, 2005.

GONZALES-BARRON, U., BUTLER, F. Fractal texture analysis of bread crumb digital images. **European Food Research and Technology**, v. 226, p. 226-271, 2008.

GOTO, K., FUKAI, K., HIKIDA, J., NANJO, F., HARA, Y. Isolation and structural analysis of oligosaccharides from yacon (*Polymnia sonchifolia*). **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, v. 59, n. 12, p. 2346-2347, 1995.

GRAEFE, S., HERMANN, M., MANRIQUE, I., GOLOMBEK, S., BUERKERT, A. Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. **Fields Crop Research**, v. 86, p. 157-165, 2004.

HENDERSON, S. M., PABIS, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

HILDEBRAND, D. **Fructans**, 2004. Disponível em <http://www.uky.edu/~dhild/biochem/13/lect13.html>. Acesso em Out./2011.

HUNTERLAB. What is color and how is measured. **Applications Note**, v.12, n.5, p.1-8, 2000.

JAYA, S., DAS, H. A vacuum drying model for mango pulp. **Drying Technology**, v. 21, n. 7, p. 1215-1234, 2003.

KERDPIBOON, S., DEVAHASTIN, S. Fractal characterization of some physical properties of a food product under various drying conditions. **Drying Technology** v. 25, n.1, p. 135-146, 2007.

KERDPIBOON, S., KERR, W. L., DEVAHASTIN, S. Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a function of fractal dimension and moisture content. **Food Research International**, v. 39, p. 1110-1118, 2006.

KERDPIBOON, S., DEVAHASTIN, S., KERR, W. L. Comparative fractal characterization of physical changes of different food products during drying. **Journal of Food Engineering**, v. 83, p. 570-580, 2007.

KOTOVICZ, V. **Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon (*Polymnia sonchifolia*)**. 89f. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LACHMAN, J., FERNÁNDEZ, E. C., ORSÁK, M. Yacon [*Smallanthus sonchifoli* (Poepp. Et End.) H. Robinson] chemical composition and use – a review. **Plant Soil Environment**, v. 49,

n. 6, p. 283-290, 2003.

LACHMAN, J., HAVRLAND, B., FERNÁNDEZ, E. C., DUDJAK, J. Saccharides of yacon [*Smallanthus sonchifoli* (Poepp. Et End.) H. Robinson] tubers and rhizomes and factors affecting their content. **Plant Soil Environment**, v. 50, n. 6, p. 383-390, 2004.

LEWICKI, P. P. Design of hot air drying for better foods. **Trends in Food Science and Technology**, v. 17, p. 153-163, 2006.

LIMA, J. M. **Influência da temperatura de armazenamento e atmosfera modificada sobre o pH, acidez total titulável, sólidos solúveis e parâmetros microbiológicos dos tubérculos de yacon (*Polymnia sonchifolia*) minimamente processados.** 2003. 135f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

MADAMBA, P. S., LIBOON, F. A. Optimization of the vacuum dehydration of celery (*Apium graveolens*) using the response surface methodology. **Drying Technology**, v. 19, p. 611-626, 2001.

MALGAREZZI, S. R. R., LENZI, M. K. **Modelo de catalisadores utilizando geometria fractal.** In: LIVRO DE RESUMOS DO 17º EVENTO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Curitiba: Editora UFPR, 2009.

MANDELBROT, B.B. **The Fractal Geometry of Nature.** Nova Iorque: W.H. Freeman, 1983. 460p.

MARSHALL, M., KIM, J., WEI, C. **Enzymatic Browning in Fruits, Vegetables and Seafoods,** 2000. Disponível em [http://www.fao.org/ag/ags/agsi/ENZYMEFINALEnzymatic%20Browning.h](http://www.fao.org/ag/ags/agsi/ENZYMEFINALEnzymatic%20Browning.html)tml. Acesso em Dez. 2005.

MICHELS, I. **Aspectos tecnológicos do processamento mínimo de tubérculos de yacon**

(*Polymnia sonchifolia*) armazenados em embalagens com atmosfera modificada. 2005. 108f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MOSCATTO, J. A., BORSATO, D., BONA, E., OLIVEIRA, A. S., HAULY, M. C. O. The optimization of the formulation for a chocolate cake containing inulin and yacon meal. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 41, p. 181-188, 2006.

MOURA, C. P. **Aplicação de redes neurais para a predição e otimização da cinética de secagem de yacon (*Polymnia sonchifolia*) com pré-tratamento osmótico**. 2004. 115f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MOYANO, P.C., TRONCOSO, E., PEDRESCHI, F. Modeling texture kinetics during thermal processing of potato products. **Journal of Food Science**, v. 72, p. E102-E107, 2007.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. Boca Raton: CRC Press. 2006. 1312p.

NARAI-KANAYAMA, A., TOKITA, N., ASO, K. Dependence of fructooligosaccharide content on activity of fructooligosaccharide-metabolizing enzymes in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) tuberous roots during storage. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 6, p. S381-S387, 2007.

NEVES, V. A., SILVA, M. A. Polyphenol oxidase from yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, p. 2424-2430, 2007.

NIAMNUY, C., DEVAHASTIN, S., SOPONRONNARIT, S. Changes in protein composition and their effects on physical changes of shrimp during boiling in salt solution. **Food Chemistry**, v. 108, p. 165-175, 2008.

NIST/SEMATECH. **E-handbook of Statistical Methods**, 2003. Disponível em <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/tool aids/pff/5-pri.pdf>. Acesso em jul./2010.

O'CALLAGHAN, J. R., MENZIES, D. J., BAILEY, P. H. Digital simulation of agricultural

dryer performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 16, n. 3, p. 223-244, 1971.

OLIVEIRA, E. G., ROSA, G. S., MORAES, M. A., PINTO, L. A. A. Characterization of thin layer drying of *Spirulina platensis* utilizing perpendicular air flow. **Biosource Technology**, v. 100, p. 1297-1303, 2009.

OVERHULTS, D. D., WHITE, G. M., HAMILTON, M. E., ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 2, p. 195-200, 1973.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer. Departamento de Engenharia Mecânica, Purdue University, West Lafayette, 1949. **Dissertação de mestrado**.

PADILHA, V. M., ROLIM, P. M., SALGADO, S. M., LIVERA, A. V. S., OLIVEIRA, M. G. Tempo de secagem e da atividade de óxido-redutases de *yacon* (*Smallanthus sonchifolius*) sob tratamento químico. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 2178-2184, 2009.

PARK, J. S., YANG, J. S., HWANG, B. Y., YOO, B. K., HAN, K. Hypoglycemic effect of yacon tuber extract and its constituent, Chlorogenic acid, in streptozotocin-induced diabetic rats. **Biomolecules and Therapeutics**, v. 17, n. 3, p. 256-262, 2009.

PEDRESCHI, R., CAMPOS, D., NORATTO, G., CHIRINOS, R., CISNEROS-ZEVALLOS, L. Andean yacon roots (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. Endl.) fructooligosaccharides as a potential novel source of prebiotics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 5278-5284, 2003.

PÉREZ-NIETO, A., CHANONA-PÉREZ, J. J., FARRERA-REBOLLO, R. R., GUTIÉRREZ-LÓPEZ, G. F., ALAMILLA-BELTRÁN, L., CALDERÓN-DOMÍNGUEZ, G. Image analysis of structural changes in dough during baking. **LWT - Food Science and Technology**, v. 43, p. 535-543, 2010.

PINTO, J. C., SCHWAAB, M. **Análise de Dados Experimentais: I: Fundamentos de Estatística e Estimação de Parâmetros**. Rio de Janeiro: E-papers. 2007. 462p.



QUEVEDO, R., CALOS, L. G., AGUILERA, J. M., CADOCHÉ, L. Description of food surfaces and microstructural changes using fractal image texture analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 53, n. 4, p. 361–371, 2002.

QUEVEDO, R., DÍAZ, O., CAQUEO, A., RONCEROS, B., AGUILERA, J. M. Quantification of enzymatic browning kinetics in pear slices using non-homogeneous L\* color information from digital images. **LWT – Food Science and Technology**, v. 42, p. 1367-1373, 2009a.

QUEVEDO, R., DÍAZ, O., RONCEROS, B., PEDRESCHI, F., AGUILERA, J. M. Description of the kinetic enzymatic browning in banana (*Musa cavendish*) slices using non-uniform color information from digital images. **Food Research International**, v. 42, p. 1309-1314, 2009b.

QUEVEDO, R., JARAMILLO, M., DÍAZ, O., PEDRESCHI, F., AGUILERA, J. M. Quantification of enzymatic browning in apple slices applying the fractal texture Fourier image. **Journal of Food Engineering**, v. 95, p. 285-290, 2009c.

RAHMAN, M. S., AL-SHAMSI, Q. H., BENGTSSON, G. B., SABLANI, S. S., AL-ALAWI, A. Drying kinetics and allicin potential in garlic slices during different methods of drying. **Drying Technology**, v. 27, p. 467-477, 2009.

RAINTREE NUTRITION. **Yacon** (*Smallanthus sonchifolius*) **Pictures**, 1996. Disponível em <http://www.rain-tree.com/Plant-Images/yacon-pic.htm>. Acesso em Out./2011.

REIS, F. R., MASSON, M. L., WASZCZYNSKYJ, N. Efeito da secagem convectiva e a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de berinjela. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 8, n. 2, p. 163-169, 2006.

REIS, F. R., MASSON, M. L., WASZCZYNSKYJ, N. Influence of a blanching pretreatment on color, oil uptake and water activity of potato sticks, and its optimization. **Journal of Food Process Engineering**, v. 31, n. 6, p. 833-852, 2008.

REIS, F. R., LENZI, M. K., MASSON, M. L. Effect of vacuum drying conditions on the quality of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices: process optimization towards color quality. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2011. Disponível em <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-4549.2011.00555.x/pdf>. Acesso em 25 Nov. 2011.

REIS, F. R., LENZI, M. K., MUÑIZ, G. I. B., NISGOSKI, S., MASSON, M. L. Vacuum drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and the effect of process conditions on fractal dimension and rehydration capacity. **Drying Technology**, v. 30, p. 13-19, 2012.

ROCKLAND, L.B., BEUCHAT, L.R. **Water activity: theory and applications to food**. Nova Iorque: Marcel Dekker, 1987.

ROSA, C. S., OLIVEIRA, V. R., VIERA, V. B., GRESSLER, C., VIEGA, S. Elaboração de bolo com farinha de yacon. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p. 1869-1872, 2009.

RUIZ-LÓPEZ, I. I., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C. E., COBOS-VIVALDO, R., HERMAN-LARA, E. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods. **Journal of Food Engineering**, v. 89, p. 310-318, 2008.

SAHARI, M. A., HAMIDI-ESFEHANI, Z., SAMADLUI, H. Optimization of vacuum drying characteristics of date powder. **Drying Technology**, v. 26, p. 793-797, 2008.

SCHER, C. F., RIOS, A. O., NOREÑA, C. P. Z. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p. 2169-2175, 2009.

SILVA, E. B. **Processamento de bebida funcional à base do yacon (*Polymnia sonchifolia* Poepping e Endlicher)**. 2004. 113f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SIMONOVSKA, B., VOVK, I., ANDRENŠEK, S., VALENTOVÁ, K., ULRICHOVÁ, J. Investigation of phenolic acids in yacon (*Smallanthus sonchifolius*) leaves and tubers. **Journal of Chromatography A**, v. 1016, p 89-98, 2003.

SON, S. M., MOON, K. D., LEE, C. Y. Inhibitory effects of various antibrowning agents on apple slices. **Food Chemistry**, v. 73, p. 23-30, 2001.

TAKENAKA, M., NANAYAMA, K., ONO, H., NAKAJIMA, H., ISOBE, S. Changes in the concentration of phenolic compounds during growing, storing and processing of yacon. **Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology**, v. 53, n. 12, p. 603-611, 2006.

TAKENAKA, M., YAN, X., ONO, H., YOSHIDA, M., NAGATA, T., NAKANISHI, T. Caffeic acid derivatives in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 793-796, 2003.

THOMKAPANICH, O., SUVARNAKUTA, P., DEVAHASTIN, S. Study of intermittent low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. **Drying Technology**, v. 25, p. 205-223, 2007.

TRONCOSO, E., PEDRESCHI, F. Modeling of textural changes during drying of potato slices. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 577-584, 2007.

VEGA-GÁLVEZ, A., MIRANDA, M., BILBAO-SÁINZ, C., URIBE, E., LEMUS-MONDACA, R. Empirical modeling of drying process for apple (cv Granny Smith) slices at different air temperatures. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 32, p. 972-986, 2008.

WEISSTEIN, E. W. **Koch Snowflake**, 2011. Disponível em <http://mathworld.wolfram.com/KochSnowflake.html>. Acesso em Nov./ 2011.

YAN, X., SUZUKI, M., OHNISHI-KAMEYAMA, M., SADA, Y., NAKANISHI, T., NAGATA, T. Extraction and identification of antioxidants in the roots of yacon (*Smallanthus*

*sonchifolius*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 47, p. 4711-4173, 1999.

ZHANG, M., LI, C., DING, X., CAO, C. W. Optimization for preservation of selenium in sweet pepper under low-vacuum dehydration. **Drying Technology**, v. 21, n. 3, p. 569-579, 2003.